

ISSN 2658-4123  
eISSN 2658-6525

# ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

## ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

**2024** Том 34, № 4  
Vol. 34, no. 4

DOI: [10.15507/2658-4123](https://doi.org/10.15507/2658-4123)

doi: 10.15507/2658-4123.034.202404

ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

**Том 34, № 4. 2024**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Основан в январе 1990 г.  
Периодичность издания –  
4 раза в год

16+



**Vol. 34, no. 4. 2024**

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Periodicity:  
Quarterly

# ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

**Учредитель и издатель –**  
федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего  
образования «Национальный  
исследовательский Мордовский  
государственный университет  
им. Н. П. Огарева»

Предыдущее название (до 2019 года):  
**Вестник Мордовского университета**

**FOUNDER AND PUBLISHER –**  
Federal State  
Budgetary Educational  
Institution  
of Higher Education  
“National Research  
Ogarev Mordovia  
State University”

The previous name until beginning of 2019:  
**Mordovia University Bulletin**

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)

Индексируется и архивируется в Web of Science Core Collection (ESCI),  
Russian Science Citation Index (RSCI),  
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),  
Committee on Publication Ethics (COPE),

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),  
реестровая запись ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018 г.

Подписной индекс – **70539**

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**  
430005, Российская Федерация,  
Республика Мордовия,  
г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1  
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

**Founder, Publisher and Editorial House address:**  
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,  
Republic of Mordovia,  
Russian Federation  
Tel/Fax: +7 8342 481424

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», 2024

## Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

Цель научного журнала открытого доступа «Инженерные технологии и системы» – знакомство читателей с результатами оригинальных научных исследований в области агропромышленного комплекса и машиностроения России и зарубежных стран. Миссия журнала – создание международной площадки для научной дискуссии исследователей, обмена опытом и публикации актуальных достижений в сфере инженерных систем и технологий.

Журнал адресован исследователям и специалистам, работающим в машиностроении и сельском хозяйстве, преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений, а также широкому кругу читателей, интересующихся перспективными направлениями отечественной и зарубежной инженерии.

Редакция журнала осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих статей. Рукопись статьи направляется на рецензирование для оценки ее научного содержания нескольким ведущим специалистам соответствующего профиля, имеющим научную специализацию, наиболее близкую к тематике статьи.

Редакция журнала реализует принцип нулевой толерантности к плагиату. Мониторинг некорректного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)
- 1.3.6. Оптика (технические науки)
- 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
- 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics (COPE), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef и международного сообщества рецензентов Publons

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная





## Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

The purpose of the open access academic journal Engineering Technologies and Systems is to introduce the readers to the results of original scientific research in the field of agroindustrial complex and mechanical engineering of Russia and foreign countries. The mission of the journal is to create an international platform for scholarly disputes of researchers, exchange of experience and publication of the articles on current achievements in the field of engineering systems and technologies.

The journal is addressed to researchers and specialists working in mechanical engineering and agriculture, teachers, postgraduates and students of higher educational institutions, and to a wide range of readers interested in advanced research directions of domestic and foreign engineering.

The Editorial Board reviews (double-blind review) all incoming papers. The manuscript of the article is sent for review to several leading specialists of the corresponding profile, who have scientific specialization closest to the subject of the article, to evaluate the scientific content.

The Editorial Board follows the principle of zero tolerance to plagiarism. The incorrect citations shall be monitored with the help of Antiplagiat and iThenticate systems.

The journal is distributed in Russian Federation and other countries of the world.

The journal offers direct open access to full-text issues based on the following principle: open access to research results contributes to the global knowledge sharing.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Russian Index of Science Citation

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics (COPE), Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef and the international community of reviewers Publons

All the materials of the Engineering Technologies and Systems journal are available under Creative Commons "Attribution" 4.0 license



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Сенин Петр Васильевич** – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы развития научно-образовательного потенциала Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, [vice-rector-innov@adm.mrsu.ru](mailto:vice-rector-innov@adm.mrsu.ru) (Саранск, Российская Федерация)

**Левцев Алексей Павлович** – *заместитель главного редактора*, технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, [levtzevap@mail.ru](mailto:levtzevap@mail.ru) (Саранск, Российская Федерация)

**Чаткин Михаил Николаевич** – *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, [chatkinm@yandex.ru](mailto:chatkinm@yandex.ru) (Саранск, Российская Федерация)

**Гордина Екатерина Павловна** – *ответственный секретарь* редакции научных журналов Национального исследовательского Мордовского государственного университета, [vestnik\\_mrsu@mail.ru](mailto:vestnik_mrsu@mail.ru) (Саранск, Российская Федерация)

**Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы** – доктор биологических наук, академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования Московского педагогического государственного университета (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Бартынского государственного университета (Бартын, Турция)

**Астахов Михаил Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611> (Калуга, Российская Федерация)

**Булгаков Алексей Григорьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства Юго-Западного государственного университета (Курск, Российская Федерация); профессор строительного факультета Дрезденского технического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4261-9840> (Дрезден, Германия)

**Гербер Юрий Борисович** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833> (Симферополь, Российская Федерация)

**Чжень Дайфен** – Ph.D., профессор, декан Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологии, директор Международной объединенной лаборатории по экологической энергетике судов и контролю выбросов Цзянсу, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-2199> (Чжэньцзян, Китай)

**Димитров Валерий Петрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674> (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Жачкин Сергей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011> (Воронеж, Российская Федерация)

**Железникова Ольга Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент, директор Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (Саранск, Российская Федерация)

**Игумнов Леонид Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ТКЭМ ИИТММ Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119> (Нижегород, Российская Федерация)

**Истомина Наталья Леонидовна** – доктор физико-математических наук, начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научноорганизационной работе ОФН РАН; профессор кафедры управления инновациями Московского авиационного института (национального исследовательского университета); главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6008-1226> (Москва, Российская Федерация)

**Кечемайкин Владимир Николаевич** – кандидат экономических наук, доцент, директор Рузаевского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (Саранск, Российская Федерация)

**Котин Александр Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8235-0052> (Саранск, Российская Федерация)

**Кусмарцев Федор Васильевич** – Ph.D., декан физического факультета Университета Лафборо (Лафборо, Великобритания); профессор Колледжа искусств и наук Университета Халифы (Абу-Даби, ОАЭ)

**Кухарев Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, ректор Пензенского государственного аграрного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3519-4066> (Пенза, Российская Федерация)

**Лобачевский Яков Петрович** – доктор технических наук, профессор, академик РАН, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962> (Москва, Российская Федерация)

**Микаева Светлана Анатольевна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники МИРЭА – Российского технологического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X> (Москва, Российская Федерация)

**Несмиян Андрей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и средств механизации агропромышленного комплекса, заместитель директора по научной работе и инновациям Азово-Черноморского инженерного института Донского государственного аграрного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081> (Зерноград, Российская Федерация)

**Остриков Валерий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского научно-исследовательского института использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X> (Тамбов, Российская Федерация)

**Плотников Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591> (Киров, Российская Федерация)

**Прытков Юрий Николаевич** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоотехники имени профессора С. А. Лапшина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4344-4383> (Саранск, Российская Федерация)

**Рудик Феликс Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологий продуктов питания Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115> (Саратов, Российская Федерация)

**Рябочкина Полина Анатольевна** – доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-8486> (Саранск, Российская Федерация)

**Салем Абдель-Бадех Мохамед** – доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор, руководитель исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук университета Айн Шамс, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0268-6539> (Каир, Египет)

**Симдянкин Аркадий Анатольевич** – доктор технических наук, профессор кафедры биомеханики и естественно научных дисциплин Российского университета спорта «ГЦОЛИФК», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183> (Москва, Российская Федерация)

**Скрябин Владимир Александрович** – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения Пензенского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198> (Пенза, Российская Федерация)

**Тарасов Евгений Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343> (Самара, Российская Федерация)

**Федулова Лилия Вячеславовна** – доктор технических наук, профессор РАН, заведующий экспериментальной клиникой лаборатории биологически активных веществ животного происхождения Федерального научного центра пищевых систем имени В. М. Горбатова РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-930X> (Москва, Российская Федерация)

**Шишелова Тамара Ильинична** – доктор технических наук, профессор кафедры физики Иркутского национального исследовательского технического университета, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7533-2401> (Иркутск, Российская Федерация)

## EDITORIAL BOARD

**Petr V. Senin** – *Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Higher School for Development of Scientific and Educational Potential of the National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

**Alexey P. Levitsev** – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Heat and Power Systems, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, levtzevap@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

**Mikhail N. Chatkin** – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mobile Energy Facilities and Agricultural Machines named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru (Saransk, Russian Federation)

**Ekaterina P. Gordina** – *Executive Editor*, National Research Mordovia State University, vestnik\_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

**Surkhay Allahverdiyev** – Dr.Sci. (Biol.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Chair of Ecology and Nature Management, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartin University (Bartın, Turkey)

**Mikhail V. Astakhov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611> (Kaluga, Russian Federation)

**Alexey G. Bulgakov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of the Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4261-9840> (Dresden, Germany)

**Daifen Chen** – Ph.D., Professor, Dean of the School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology; Director of the International Joint Laboratory of Ship Green Power and Emission Control of Jiangsu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-2199> (Zhenjiang, China)

**Valeriy P. Dimitrov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674> (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Liliya V. Fedulova** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of RAS, Head of the Experimental Clinic of the Laboratory of Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbатов Federal Research Center of Food Systems, Russian Academy of Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-930X> (Moscow, Russian Federation)

**Yuriy B. Gerber** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Technology and Equipment for Producing and Processing Livestock Products, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833> (Simferopol, Russian Federation)

**Leonid A. Igumnov** – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Principal Researcher of Research Institute of Mechanics, Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119> (Nizhniy Novgorod, Russian Federation)

**Natalia L. Istomina** – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6008-1226> (Moscow, Russian Federation)

**Vladimir N. Kechemaykin** – Cand.Sci. (Econ.), Associate Professor, Director of the Ruzavka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)



- Alexander V. Kotin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8235-0052> (Saransk, Russian Federation)
- Oleg N. Kukharev** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3519-4066> (Penza, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Ph.D., Head of the Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of the College of Arts and Sciences, Khalifa University (Abu Dhabi, UAE)
- Yakov P. Lobachevskiy** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, First Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of RAS, Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962> (Moscow, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electronics, MIREA – Russian Technological University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X> (Moscow, Russian Federation)
- Andrey Yu. Nesmiyan** – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Research and Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767> (Zernograd, Russian Federation)
- Valeriy V. Ostrikov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Director of the All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X> (Tambov, Russian Federation)
- Sergey A. Plotnikov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591> (Kirov, Russian Federation)
- Yuriy N. Prytkov** – Dr.Sci. (Agric.), Professor of the Prof. S. A. Lapshin Chair of Zootechnics, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)
- Feliks Ya. Rudik** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115> (Saratov, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Scientific Officer of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-8486> (Saransk, Russian Federation)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Dr.Sci. (CS), Professor Emeritus, Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of the Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0268-6539> (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)
- Arkadii A. Simdiankin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technical Biomechanics and Natural Science Subjects, Russian University of Sport (GTSOLIFK), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183> (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198> (Penza, Russian Federation)
- Evgeniy M. Tarasov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343> (Samara, Russian Federation)
- Sergey Yu. Zhachkin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011> (Voronezh, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)



## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

<b>Уланов А. С., Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Наумкин Д. А.</b> Исследование твердости почвы в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения .....	530
<b>Чулков А. С., Чапыгин М. Е., Шайхов М. М.</b> Обоснование параметров работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для селекционной сеялки .....	549
<b>Брюханов А. Ю., Романовская А. А., Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Вертянкина В. Ю.</b> Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов .....	563
<b>Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмяшкин Е. А.</b> Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники .....	584
<b>Мифтахов Э. Н.</b> Алгоритм поиска оптимального режима подачи регулятора в процессе получения полимерных продуктов .....	597

### **АГРОИНЖЕНЕРИЯ**

<b>Гербер Ю. Б., Калиновская Т. В., Гаврилов А. В., Киян Н. С.</b> Исследование влияния режима гомогенизации на энергетические затраты и сроки хранения йогурта с добавлением пюре кизила .....	615
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

### **ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ**

<b>Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Сидоркин О. А., Пустоветов А. В.</b> Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC .....	629
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

### **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ**

<b>Выходцев П. В., Ростов В. В., Степченко А. С.</b> Моделирование разряда суперконденсаторного накопителя при стабилизации тока в обмотках многосекционной магнитной системы .....	648
<b>Чепелев Ю. Г., Ермоленко Д. В., Юферев Л. Ю., Рошин О. А.</b> Исследование индукционного нагрева скользящих металлоконструкций на повышенной частоте .....	668
<i>Информация для авторов и читателей</i> .....	683

## **CONTENTS**

### ***TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT***

<b>Ulanov A. S., Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Naumkin D. A.</b> Investigating the Soil Hardness on Personal Subsidiary and Individual Peasant Farms .....	530
<b>Chulkov A. S., Chaplygin M. E., Shaykhov M. M.</b> Justifying the Operation Parameters of a Robotic Cassette Loading Device of the Carousel Type for a Selection Seeder .....	549
<b>Briukhanov A. Yu., Romanovskaya A. A., Shalavina E. V., Vasilev E. V., Vertyankina V. Yu.</b> Effect of Animal and Poultry Manure Processing Technologies on Greenhouse Gas Emissions .....	563
<b>Senin P. V., Chatkin M. N., Kilmyashkin E. A.</b> Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment .....	584
<b>Miftakhov E. N.</b> Algorithm for Searching the Optimal Regulator Supply Mode in the Process of Manufacturing Polymer Products .....	597

### ***FOOD SYSTEMS***

<b>Gerber Y. B., Kalinovskaya T. V., Gavrilov A. V., Kiyani N. S.</b> Investigation of the Effect of the Homogenization Regime on Energy Costs and Shelf Life of Yogurt with Dogberry Puree .....	615
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

### ***FRICTION AND WEAR IN MACHINES***

<b>Zhachkin S. Y., Trifonov G. I., Sidorkin O. A., Pustovetov A. V.</b> Wear Resistance of Nickel Composite Coatings with Micron-Sized and Submicron-Sized Particles of SiC .....	629
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

### ***ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT***

<b>Vykhodtsev P. V., Rostov V. V., Stepchenko A. S.</b> Simulation of the Discharge of a Supercapacitor Storage Device during Current Stabilization in the Windings of a Multi-Section Magnetic System .....	648
<b>Chepelev Yu. G., Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A.</b> Study of Induction Heating of Metal Structures at Increased Frequency .....	668
<b>Information for Authors and Readers of the Journal</b> .....	683

# ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.530-548>

EDN: <https://elibrary.ru/awrotp>

УДК 631.4:33:351.755

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

*Оригинальная статья / Original article*



## Исследование твердости почвы в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения

**А. С. Уланов, В. Ф. Купряшкин** , **Н. И. Наумкин,**

**Д. А. Наумкин**

*Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
(г. Саранск, Российская Федерация)*

 [kupwfm@mail.ru](mailto:kupwfm@mail.ru)

### *Аннотация*

*Введение.* Овощеводство является одной из важнейших отраслей сельскохозяйственного производства. Оно осуществляется как на сельскохозяйственных предприятиях, так и на сельскохозяйственных личных подсобных и других индивидуальных хозяйствах населения. Возделывание овощных культур в условиях личных подсобных хозяйств всегда сопряжено с обработкой почвы: вспашкой, культивацией, фрезерованием и т. д. Для осуществления разных видов обработки почвы активно используются средства малой механизации, в частности мотоблоки, опыт эксплуатации которых, наряду с исследованиями в области эффективности их функционирования, позволяет определить ряд способов для повышения качества обработки почвы. Анализ способов повышения эффективности функционирования мотоблоков выявил, что на показатель производительности существенное влияние оказывают конкретные почвенные условия работы агрегатов, а именно твердость обрабатываемой почвы.

*Цель исследования.* Определение твердости среднесуглинистой серой лесной почвы на различных почвенных горизонтах, характерных для выращивания основных плодово-овощных культур в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения.

*Материалы и методы.* Твердость почвы измеряется твердомерами различных типов действия: ударными, статически нагруженными и принудительно вдавливающими в почву деформатор (конус, цилиндр, шар). В ходе исследования был проведен анализ приборов и устройств для измерения твердости почвы. Схема определения твердости почвы включала в себя измерения после уборки овощных культур: картофеля, выкопанного при помощи мотоблока с пассивным картофелевыкапывателем; картофеля, выкопанного при помощи ручного инструмента (лопаты); свеклы кормовой;

© Уланов А. С., Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Наумкин Д. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

тыквы столовой; репчатого лука. Твердость почвы определяли с помощью твердомера (пенетromетра) фирмы Wile Soil.

*Результаты исследования.* Использование твердомеров в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения затруднено из-за дороговизны, а также из-за того, что такие приборы в основной своей массе являются специализированной лабораторной техникой, требующей определенных навыков при использовании. Определение твердости почвы земельных участков населения в послеуборочный период является актуальной задачей, так как влияет на функционирование мотоблоков, а именно – позволяет операторам проводить обработку почвы на максимально эффективных режимах, повышая тем самым производительность почвообрабатывающего агрегата.

*Обсуждение и заключение.* На основании анализа результатов экспериментальных исследований получены уравнения регрессии, позволяющие определить значение твердости среднесуглинистой серой лесной почвы (на глубине до 20 см) после уборки сельскохозяйственных культур, наиболее распространенных для выращивания в условиях личных подсобных хозяйств у населения Республики Мордовия.

**Ключевые слова:** овощеводство, механическая обработка почвы, мотоблок, твердость почвы, твердомер, глубина обработки, уравнения регрессии

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование твердости почвы в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения / А. С. Уланов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 530–548. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.530-548>

## Investigating the Soil Hardness on Personal Subsidiary and Individual Peasant Farms

A. S. Ulanov, V. F. Kupryashkin<sup>✉</sup>, N. I. Naumkin,  
D. A. Naumkin

*National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)*

<sup>✉</sup> [kupwvf@mail.ru](mailto:kupwvf@mail.ru)

### **Abstract**

*Introduction.* Vegetable growing is one of the most important branches of agricultural production. Production of vegetables is carried out in both agricultural enterprises and on personal subsidiary and individual peasant farms. Growing vegetable crops on personal subsidiary and individual peasant farms involves tillage: plowing, cultivation, milling, etc. For tillage, there are actively used small tools, in particular tillers. The experience of their use and the research on the effectiveness of their functioning allow identifying ways to improve tillage quality.

*Aim of the Study.* The study is aimed at identifying the hardness of medium-loamy gray forest soil on different soil horizons typical for growing fruits and vegetables in personal subsidiary and individual peasant farms.

*Materials and Methods.* To measure the soil hardness, there are used different types of penetrometers: percussion, statically loaded and forcibly pressing a deformer (cone, cylinder, and ball) into the soil. In the study, instruments and devices for measuring the soil hardness were analyzed. The scheme of the soil hardness analysis included measurements

after harvesting the following crops: potatoes dug using a motor cultivator with a passive potato digger, potatoes dug with a hand tool (shovel), fodder beets, squashes, and common onions. The soil hardness was measured using a hardness tester (penetrometer) manufactured by Wile Soil.

*Results.* The use of hardness testers in personal subsidiary and individual peasant farms is difficult due to their high cost and to the fact that the most part of these devices are specialized laboratory equipment, which require specific skills when used. Analyzing the soil hardness on personal subsidiary and individual peasant farms in the post-harvest period is a relevant task for optimal functioning of tillers, namely, it will allow operators to use the most efficient modes for tillage that will increase the tillage unit performance.

*Discussion and Conclusions.* Based on the analysis of the results of the experimental studies, there have been obtained the regression equations that allow determining the value of the hardness of medium-loamy gray forest soil from a depth (up to 20 cm) in the period after harvesting crops, which are the most common for growing in personal subsidiary and individual peasant farms of the Republic of Mordovia.

**Keywords:** vegetable growing, mechanical tillage, motor cultivator, soil hardness, hardness tester, processing depth, regression equations

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Ulanov A.S., Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Naumkin D.A. Identifying the Soil Hardness on Personal Subsidiary and Individual Peasant Farms. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):530–548. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.530-548>

**Введение.** Овощеводство – одна из важных отраслей сельскохозяйственного производства. В летне-осенний период оно удовлетворяет потребности населения в свежей овощной продукции, а правильное хранение и возможность консервации обеспечивают круглогодичную возможность употребления ее в пищу [1]. Овощеводство является одной из отраслей сельского хозяйства, в которой в последние годы наблюдался рост валовых сборов продукции<sup>1</sup>. Производство овощей осуществляется как на сельскохозяйственных предприятиях, так и сельскохозяйственных личных подсобных угодьях и других индивидуальных хозяйствах населения [2]. В настоящее время на индивидуальные хозяйства населения приходится почти 80 % всей выращиваемой овощной продукции Республики Мордовия. Согласно статистике на 2021 г. площадь сельскохозяйственных земель личных подсобных хозяйств жителей Мордовии составляет 158,8 тыс. га, из которых 30,4 тыс. приходится на пашню. Из 30,4 тыс. га 27,7 тыс. используются для выращивания плодово-овощных культур: 12,7 тыс. га (45,8 %) заняты картофелем; 8,9 тыс. га (32,2 %) – кормовыми культурами (свекла, кукуруза, подсолнечник и др.); 0,36 тыс. га (1,3 %) – тыквой столовой; 0,3 тыс. га (1,1 %) – репчатым луком; 0,22 тыс. га (0,8 %) – томатами; 0,19 тыс. га (0,7 %) – капустой; 0,17 тыс. га (0,6 %) – морковью<sup>2</sup> [3; 4].

<sup>1</sup> Технологии овощеводства : учебное пособие / М. И. Машенков [и др.]. Оренбург : Оренбургский ГАУ, 2020. 478 с. URL: <https://e.lanbook.ru/book/172659> (дата обращения: 10.01.2024).

<sup>2</sup> Основные итоги сельскохозяйственной микропереписи 2021 года. Статистический сборник [Электронный ресурс]. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Census\\_agr\\_2021.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Census_agr_2021.pdf) (дата обращения: 10.01.2024); Купряшкин В. Ф., Уланов А. С. Эффективное использование почвообрабатывающих агрегатов на базе мотоблоков : моногр. Саранск, 2021. 160 с.

Выращивание плодово-овощных культур хозяйствами населения тесным образом связано с проведением механической обработки почвы: вспашкой, фрезерованием, культивацией, боронованием, окучиванием и др. Для ее осуществления активно используются средства малой механизации, в том числе и мотоблоки. По своему функционалу мотоблоки занимают место между мотокультиваторами и минитракторами. Выбор класса мотоблока осуществляется согласно условной классификации, составленной на основе рекомендаций пользователей и производителей, учитывающей мощность двигателя, массу агрегата, глубину обработки почвы<sup>3</sup>.

Большой опыт эксплуатации мотоблоков [4; 5], агрегируемых с различными тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами (почвенные фрезы, лемешно-отвальный плуг, культиватор и др.) [6], а также исследования в области эффективности функционирования позволяют определить ряд способов для совершенствования обработки почвы:

- выбор рациональной поступательной скорости движения мотоблока;
- выбор подачи на рабочий орган (нож фрезы или лопасть ротационного плуга) за счет регулирования угловой скорости ротора;
- обеспечение постоянного угла резания рабочего органа сменного адаптера;
- выбор рациональной конструкции сменных адаптеров;
- увеличение ширины захвата фрезбарабанов;
- обработка почвы в два следа на различных глубинах;
- проведение комбинированной обработки почвы.

Представленные способы совершенствования обработки почвы во многом зависят от характера взаимодействия рабочих элементов почвообрабатывающих агрегатов с ней. Важной задачей следует считать определение конкретных значений основных физико-механических свойств почвы, в частности ее твердости, поэтому исследования, направленные на нахождение показателя твердости почвы на различных глубинах почвенного горизонта, являются актуальными и заслуживающими внимания.

**Обзор литературы.** Поступательная скорость движения мотоблока и величина подачи на рабочий орган обеспечиваются выбором необходимой передачи механической коробки переключения передач. Такие устройства могут иметь от двух до восьми передач переднего хода и двух передач заднего хода, что расширяет скоростной диапазон функционирования, приспособляя машину к некоторым конкретным условиям работы<sup>4</sup>. Однако коробка переключения передач значительно увеличивает цену мотоблоков, поэтому с целью снижения себестоимости и трудоемкости изготовления производители исключают их, используя ременно-зубчатые и ременно-цепные и ременно-цепные трансмиссии и передачи, тем самым ограничивая выбор

<sup>3</sup> Купряшкин В. Ф., Уланов А. С. Эффективное использование почвообрабатывающих агрегатов на базе мотоблоков.

<sup>4</sup> Гуреев И. И. Перспективная машина для фрезерной обработки почвы // Адаптивно-ландшафтные системы земледелия – основа оптимизации агроландшафтов : сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. (14 – 16 сентября 2016 г., г. Курск). Курск, 2016. С. 84–88. EDN: WLEKSJ

наиболее рациональных скоростных режимов функционирования почвообрабатывающих агрегатов, снижая их эффективность<sup>5</sup>.

Для устранения этого недостатка сельскохозяйственным отечественным и зарубежным машиностроением разработаны и реализованы мотоблоки с бесступенчатым регулированием скорости движения. Например, агрегаты фирмы Cairan (Франция)<sup>6</sup> оснащены трансмиссией, которая имеет высокий показатель надежности и КПД, в результате чего варьирование скоростных показателей в некотором диапазоне может осуществляться за счет изменения числа оборотов двигателя с сохранением его ресурса и без преждевременного выхода из строя. Также мотоблоки, в конструкции трансмиссий которых интегрирован клиноременный вариатор с механизмом ручного управления [7], позволяющий обеспечивать бесступенчатое регулирование скоростных режимов функционирования в зависимости от конкретных почвенных условий [8].

Движение рабочего органа (ножа) в обычном фрезерном барабане происходит с изменением угла резания, это приводит к дополнительному смятию почвы и увеличению сопротивления резания, что в свою очередь сказывается отрицательно на энергоёмкости технологического процесса обработки почвы.

С целью устранения этой проблемы были проведены исследования в области обеспечения постоянного угла резания. Они показали, что в процессе отрезания почвенной стружки ножи разработанной конструкции фрезерного барабана имеют постоянный угол резания и неизменную оптимальную траекторию движения. При работе такой конструкции наблюдается минимальное сопротивление почвы о нож [9].

Рациональная конструкция сменных адаптеров, в частности фрезбарабанов, определяется наиболее оптимальным взаимным размещением ножей. Существуют два особо эффективных варианта: расположение ножей по замкнутой спирали, расположение по встречным спиральям [10].

Увеличение ширины захвата фрезбарабанов осуществляется установкой дополнительных секций с ножами. Такой способ достаточно распространен, однако увеличение нагрузок в приводе оставляет вопросы и требует исследования в области методов их снижения, например, рассмотрения подхода к оптимальному расположению ножей на увеличенном фрезбарабане [11].

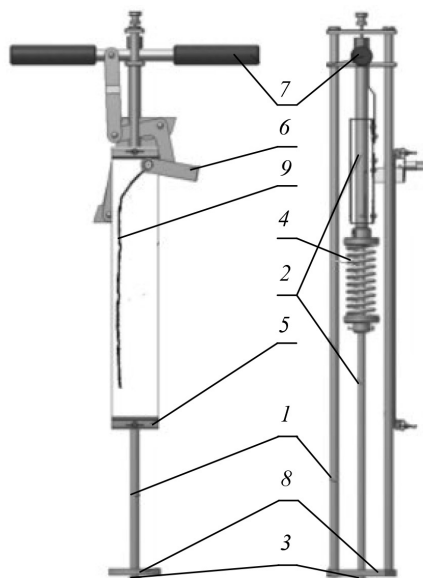
Способ обработки почвы в два следа требует повышенных энергетических затрат, он используется при работе на тяжелых переуплотненных почвах.

Разработка комбинированных агрегатов, способных за один технологический проход выполнить комплекс агротехнических операций, позволит исключить многократные проходы мотоблока, приводящие к переуплотнению верхнего слоя почвы [12].

<sup>5</sup> Синицкая Ю. С., Синицкий С. А., Лукманов Р. Р. Анализ схем механизмов привода трансмиссии средств малой механизации // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса : науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти д.т.н., проф. Мудрова П. Г. (28 – 29 октября 2021 г., г. Казань). Казань, 2021. С. 194–198. EDN: AWFFGO

<sup>6</sup> Мотоблок бензиновый CAIMAN Vario 70C TWK+ [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3ETebK> (дата обращения: 06.01.2024).

Анализ способов повышения эффективности функционирования мотоблоков выявил, что на показатель качества существенное влияние оказывают физико-механические свойства почвы, а именно ее твердость [13].



Р и с. 1. Твердомер Ревякина

1 – штанга направляющая; 2 – штанга телескопическая; 3 – деформатор; 4 – пружина;  
5 – планка для бумаги; 6 – устройство записывающее; 7 – рукоятка; 8 – основание; 9 – диаграмма

F i g. 1. Revyakin hardness tester

1 – guide rod; 2 – telescopic rod; 3 – deformer; 4 – spring; 5 – paper bar; 6 – recording device;  
7 – handle; 8 – base; 9 – diagram

*Источник:* составлено авторами.

*Source:* compiled by the authors.

Твердость почвы ( $p$ ) – способность сопротивляться внедрению в нее под давлением какого-либо деформатора<sup>7</sup>. Твердость почвы измеряют твердомерами<sup>8</sup>. Рассмотрим наиболее распространенные и применимые в сельском хозяйстве средства определения твердости почвы.

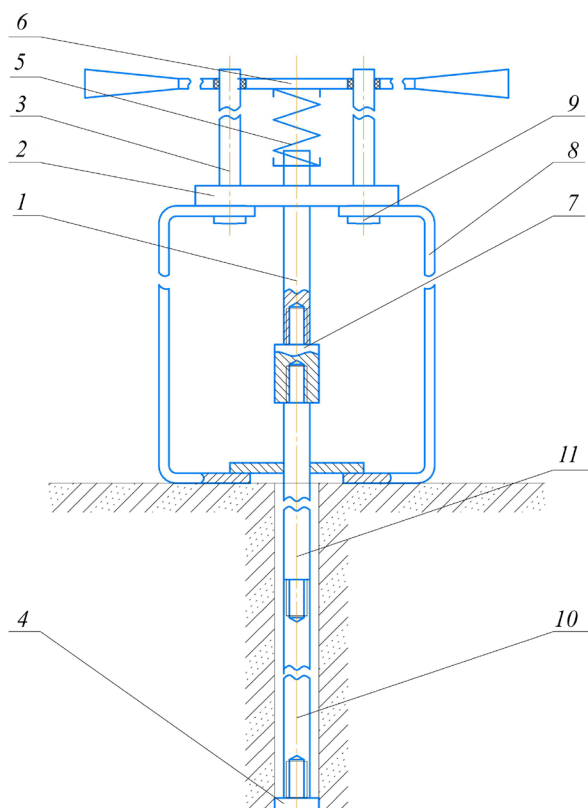
Твердомер Ревякина (рис. 1) оснащен записывающим устройством, регистрирующим степень сжатия пружины, которая зависит от характера сопротивления почвы. Диапазон глубины измерения находится в пределах от 0 до 30 см.

Учеными Всероссийского научно-исследовательского агролесомелиоративного института (ВНИАЛМИ, г. Волгоград) разработано устройство [14] для измерения твердости почвы на различной глубине (рис. 2).

<sup>7</sup> Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин : учебник для вузов по специальности «С.-х. машины» / под ред. Е. С. Босого. М. : Машиностроение, 1977. 568 с.

<sup>8</sup> Бричков С. В., Хорев П. Н. Методика проведения исследований твердости почвы при обработке почвы // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых. (25 – 26 октября 2018 г., г. Пенза). Пенза : Пенз. гос. агр. ун-т, 2018. Т. 1. С. 216–218. EDN: YRREUH





Р и с. 2. Устройство для определения твердости почвы

1 – рабочий шток; 2 – основание; 3 – направляющие штанги; 4 – наконечник; 5 – пружина;  
6 – нажимная планка с рукоятками; 7 – переходная муфта; 8 – опорная рамка; 9 – винт;  
10 – нажимной шток; 11 – промежуточный шток

F i g. 2. Device for analyzing soil hardness

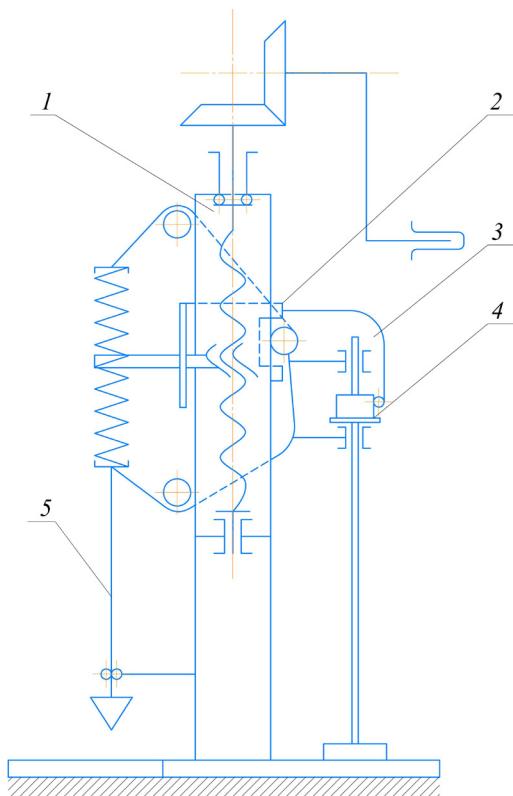
1 – working rod; 2 – base; 3 – guide rods; 4 – tip, 5 – spring; 6 – pressure plate with handles;  
7 – adapter coupling; 8 – support frame; 9 – screw; 10 – pressure rod; 11 – intermediate rod

Источник: составлено авторами статьи по материалам [14].

Source: compiled by the authors of the article based on the materials [14].

На определение твердости почвы на глубине свыше 30 см твердомером Ревякина, представленного выше, затрачивается 40–60 мин. Такие затраты времени обусловлены проведением послойного снятия почвы, так как твердомер Ревякина ограничен диапазоном функционирования по глубине. Применение же данного устройства значительно снижает (в 10 раз) время проведения экспериментальных исследований, которое теперь составит от 3 до 5 мин. Такой эффект достигается за счет отказа от послойного снятия почвы и применения в конструкции твердомера наборных промежуточных штоков.

Твердомер конструкции ВИСХОМа (рис. 3) позволяет получить данные о твердости почвы на разных глубинах, но является довольно сложным по устройству и в обращении.



Р и с. 3. Твердомер ВИСХОМ

1 – стойка, закрепленная на опорной плите; 2 – подвижная каретка; 3 – самопишущее устройство;  
4 – лентопротяжный механизм; 5 – шток со сменным плунжером

F i g. 3. The VISKHOM hardness tester

1 – tine fixed to the base plate; 2 – movable carriage; 3 – self-recording unit;  
4 – film advance mechanism; 5 – rod with a changeable plunger

*Источник:* составлено авторами статьи по материалам [15].

*Source:* compiled by the authors of the article based on the materials [15].

Помимо вышеуказанных устройств и приборов существует множество других конструктивных решений, позволяющих определить твердость почвы. К ним относятся твердомеры Горячкина, Качинского, Далина и др.<sup>9</sup> [15].

Однако, проанализировав все многообразие конструкций, нами были выявлены некоторые недостатки их использования, например, малый диапазон глубин измерений (до 0,3 м) и сложность компоновки устройств.

**Материалы и методы.** Для решения указанных проблем широкое применение получили приборы [16], действие которых основано на внедрении в почву металлического наконечника с различной площадью основания. К таким относятся твердомеры (пенетрометры) фирмы Wile Soil (рис. 4).

<sup>9</sup> Сабликов М. В. Сельскохозяйственные машины. Ч. 2. Основы теории и технологического расчета. М. : Колос, 1968. 295 с.

Эксплуатация твердомера заключается в его установке наконечником вниз строго перпендикулярно поверхности почвы. Щуп твердомера необходимо вводить в почву медленно, без рывков, надавливая на обе ручки с одинаковым усилием [17].

Твердомер укомплектовывается наконечниками диаметром 1,27 см (для проведения измерений на тяжелых почвах) и 1,91 см (для почв легкого и среднего характера сложения).



Р и с. 4. Твердомер Wile Soil  
F i g. 4. Hardness Tester Wile Soil

*Источник:* фотографии для рисунков 4, 5 сделаны А. С. Улановым при проведении исследований твердости почвы (Республика Мордовия, п. Ромоданово, 10 сентября 2023 г.).

*Source:* the photos 4, 5 are taken during soil hardness studies by A. S. Ulanov in Republic of Mordovia, Romodanovo village, September 10, 2023.

Единицей измерения на индикаторе прибора является фунт на квадратный дюйм (*Psi*). Однако использование единиц измерения твердости почвы в МПа позволяет сравнивать полученные данные с результатами других исследований, проводимых в разных лабораториях или в рамках полевых экспериментов, а также обеспечивает более точные и надежные показатели замеров, чем применение фунта на квадратный дюйм в качестве единицы измерения. Для перевода измерений твердости почвы из *Psi* в МПа используем формулу<sup>10</sup>:

$$p = ПТ \cdot 0,0069,$$

где  $p$  – твердость почвы в МПа;  $ПТ$  – показания твердомера.

Исходя из показаний твердости почвы, определяем характер ее сложения и даем оценку на соответствие одной из степеней: легкой, средней или твердой. Классификацию почв по твердости и характеру составили по Н. А. Качинскому<sup>11</sup> и свели в таблицу 1.

<sup>10</sup> Соотношения единиц давлений [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3DNRmb> (дата обращения: 12.01.2024).

<sup>11</sup> Медведев В. В. Твердость почв. Харьков : Городская типография, 2009. 152 с.

**Классификация почв по характеру сложения и твердости**  
**Classification of soils according to the soil consistency and hardness**

Характер сложения / Consistency	Твердость, МПа / Hardness, MPa	Оценка степени твердости почвы / Assessment of soil hardness degree
Рыхлое / Friable	от 0 до 1,35 / from 0 to 1.35	Легкая / Light
Рыхловатое / Rather friable	от 1,35 до 1,50 / from 1.35 to 1.50	Средняя / Middle
Плотное / Firm	от 1,50 до 1,80 / from 1.50 to 1.80	Средняя / Middle
Очень плотное / Very firm	от 1,80 до 2,75 / from 1.80 to 2.75	Твердая / Hard

Анализ приборов и устройств показал многообразие конструкций для определения твердости почвы. В условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств владельцы мотоблоков не имеют приборную базу для определения твердости почвы, на основании которой происходит выбор режимов работы или сменных рабочих адаптеров для осуществления обработки почвы. Такие приборы, как правило, дороги. Чаще всего они относятся к специализированной лабораторной технике, требующей определенных навыков при использовании.

Определение твердости почвы земельных участков населения в послеуборочный период влияет на функционирование средств малой механизации (в том числе и мотоблоков), позволяет операторам проводить обработку почвы на максимально эффективных режимах, повышает производительность почвообрабатывающего агрегата, поэтому является актуальной задачей овощеводства.

Определение твердости почвы проводилось на среднесуглинистой серой лесной почве [18], время проведения экспериментов – осень 2022 и 2023 гг. Место проведения исследований – приусадебный участок, расположенный в п. Ромоданово Ромодановского района Республики Мордовия (рис. 5). На твердость почвы также оказывает влияние показатель ее влажности, поэтому в процессе исследования контролировалась ее величина: влажность почвы при исследованиях 2022 г. составила 19,1 %, 2023 г. – 19,6 %.



Р и с. 5. Определение твердости почвы на участке посадки картофеля

F i g. 5. Measuring soil hardness at the potato planting site

Для измерения влажности почвы использовали метод горячей сушки почвенных проб с их взвешиванием до и после. На основе полученных результатов производился расчет влажности по формуле [19]:

$$w = \frac{m_b - m_c}{m_c} 100 \%,$$

где  $m_b$  – масса влажной почвенной пробы, кг;  $m_c$  – масса сухой почвенной пробы, кг.

Схема опыта включала в себя определение твердости почвы после уборки следующих сельскохозяйственных культур: 1) картофеля, выкопанного при помощи мотоблока с пассивным картофелевыкапывателем<sup>12</sup>; 2) картофеля, выкопанного при помощи ручного инструмента (лопаты); 3) свеклы кормовой; 4) тыквы столовой; 5) репчатого лука.

Измерения проводили на глубинах  $h = 5, 10, 15$  и  $20$  см в пятикратной повторности, затем выбиралось среднее значение. Точки замера размещали на одной линии, шаг между точками составлял  $1$  м [20; 21].

**Результаты исследования.** В таблице 2 сведены результаты исследований твердости почвы. Учитывая, что влажность во время проведения опыта в 2022 г. составляла  $19,1 \%$ , а в 2023 г. –  $19,6 \%$ , определим относительную погрешность ( $\delta$ ) полученных величин по формуле<sup>13</sup>:

$$\delta = \frac{X - X_0}{X_0} 100 \%,$$

где  $X$  – приближенное значение;  $X_0$  – значение, выбранное точным (эталонным). В нашем случае  $\delta = 2,6 \%$ , что не превышает показатель в  $5 \%$ . Таким образом, усредним показатели замеренных твердостей почвы за 2022 и 2023 гг.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили получить уравнения регрессии, отражающие характер изменения твердости среднесуглинистой серой лесной почвы в зависимости от глубины почвенного горизонта на участках, где выращивались распространенные в хозяйствах населения Республики Мордовия овощные культуры:

1) картофель, выкопанный при помощи мотоблока с пассивным картофелевыкапывателем (здесь и далее  $h$  – глубина внедрения металлического наконечника в почву):

$$p = 11,420h^2 + 1,489h;$$

2) картофель, выкопанный при помощи ручного инструмента (лопаты):

$$p = -1,228h^2 + 6,988h;$$

<sup>12</sup> Картофелекопатель «Нева» КНМ 005.07.0100 [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3DNSBu> (дата обращения: 11.01.2024).

<sup>13</sup> Гриценко В. В. Погрешности измерений : методические указания по организации, содержанию, оформлению и защите расчетного задания (контрольной работы) по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов направлений «Машиностроение», «Технологические машины и оборудование» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» всех форм обучения. Рубцовск : Рубцовский индустриальный институт, 2018. 35 с. URL: <https://clck.ru/3DNSi7> (дата обращения: 11.01.2024).

3) свекла кормовая:  $p = -0,571h^2 + 6,783h$ ;

4) тыква столовая:  $p = 15,880h^2 + 4,358h$ ;

5) репчатый лук:  $p = 33,480h^2 + 1,016h$ .

Т а б л и ц а 2

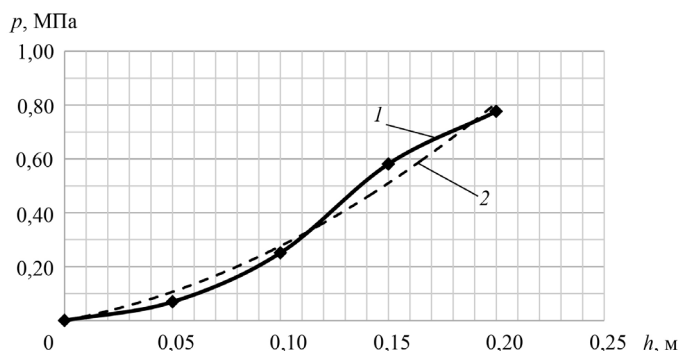
T a b l e 2

**Твердость почвы в зависимости от ее глубины и вида выращиваемой сельскохозяйственной культуры в условиях личного подсобного хозяйства за 2022 и 2023 гг.**

**Soil hardness depending on the depth and a type of agricultural crop cultivated a personal subsidiary farm for 2022 and 2023**

Сельскохозяйственная культура / Agricultural culture	Глубина <i>h</i> , см / Depth <i>h</i> , sm	Твердость почвы, МПа / Hardness, MPa		
		Год / Year		Среднее значение / The average value
		2022 (влажность почвы 19,1 %) / 2022 (soil moisture 19.1%)	2023 (влажность почвы 19,6 %) / 2023 (soil moisture 19.6%)	
Картофель (мотоблок + картофелевыкапыватель) / Potatoes (tillers + potato digger)	5	0,062	0,077	0,069
	10	0,267	0,235	0,251
	15	0,579	0,582	0,581
	20	0,746	0,805	0,776
Картофель (лопата) / Potatoes (shovel)	5	0,402	0,375	0,389
	10	0,623	0,655	0,639
	15	0,979	1,033	1,006
	20	1,335	1,294	1,315
Свекла кормовая / Fodder beet	5	0,267	0,291	0,279
	10	0,712	0,695	0,704
	15	1,113	1,057	1,085
	20	1,380	1,371	1,376
Тыква столовая / Pumpkin (squash)	5	0,312	0,289	0,301
	10	0,579	0,601	0,590
	15	0,935	0,892	0,919
	20	1,464	1,531	1,498
Лук репчатый / Onion	5	0,131	0,119	0,125
	10	0,356	0,428	0,392
	15	1,024	0,989	1,007
	20	1,513	1,574	1,544

Построены графические зависимости, представленные на рисунках 6–10. Полученные результаты коррелируют с ранее проводимыми исследованиями [22; 23].



Р и с. 6. Твердость почвы после выкопки картофеля мотоблоком, оснащенным пассивным картофелевыкапывателем:

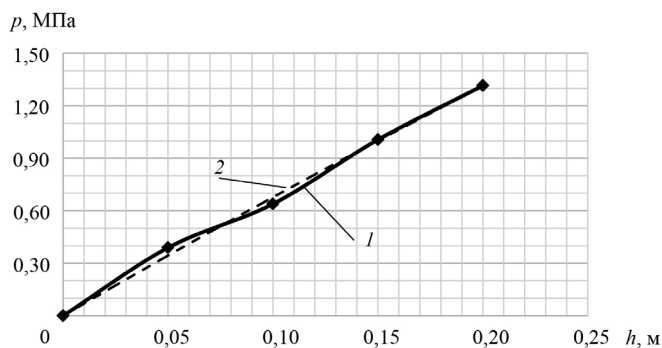
1 – экспериментальные данные; 2 – график аппроксимирующей функции

F i g. 6. Soil hardness after digging potatoes with a tillerblock, equipped with a passive potato digger: 1 – experimental data; 2 – approximating function curve

*Источник:* здесь и далее графики построены на основании полученных результатов в ходе проведения исследований твердости почвы в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения.

*Source:* hereinafter in this article the diagrams are based on the results obtained during the research of soil hardness in the conditions of personal subsidiary and individual farms of the population.

Твердость почвы после выкопки картофеля мотоблоком, агрегатируемым с пассивным картофелевыкапывателем на глубинах от 0,05 до 0,20 м составляла от 0,069 до 0,776 МПа соответственно. Данные показатели характеризуют сложение почвы как рыхлое, а степень твердости – легкую. Достаточно низкие показатели твердости почвы в рассматриваемом диапазоне вызваны применением в процессе уборки культуры механизированных средств (мотоблока), воздействующих на почву рабочим органом (пассивным картофелевыкапывателем), имеющим форму клина, тем самым выполняя, помимо прямых функций по выкапыванию клубней картофеля, операцию по рыхлению почвенного слоя.

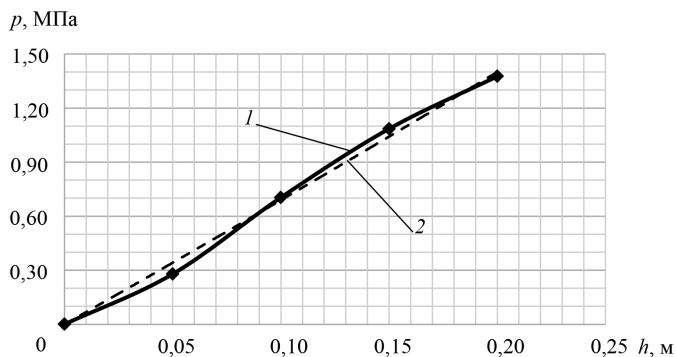


Р и с. 7. Твердость почвы после выкопки картофеля при помощи лопаты:

1 – экспериментальные данные; 2 – график аппроксимирующей функции

F i g. 7. Soil hardness after digging potatoes with a shovel: 1 – experimental data; 2 – approximating function curve

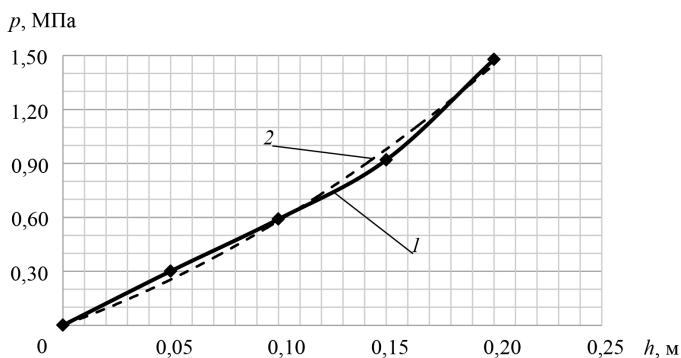
Твердость почвы после уборки картофеля с помощью ручного инструмента (лопаты) на глубинах от 0,05 до 0,20 м составляла от 0,389 до 1,315 МПа. Данные показатели характеризуют сложение почвы как рыхлое, а степень твердости – легкую.



Р и с. 8. Твердость почвы после уборки кормовой свеклы:  
1 – экспериментальные данные; 2 – график аппроксимирующей функции

F i g. 8. Soil hardness after harvesting fodder beet:  
1 – experimental data; 2 – approximating function curve

Твердость почвы после уборки кормовой свеклы на глубинах от 0,05 до 0,20 м составляла от 0,279 до 1,376 МПа. Данные показатели характеризуют сложение почвы как рыхлое, а степень твердости – легкую.

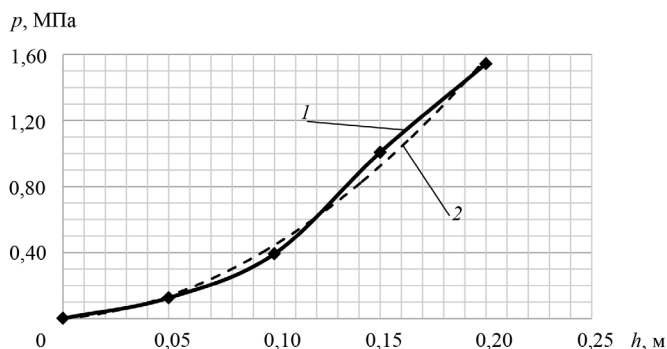


Р и с. 9. Твердость почвы после уборки тыквы столовой:  
1 – экспериментальные данные; 2 – график аппроксимирующей функции

F i g. 9. Soil hardness after harvesting the pumpkin (squash)  
1 – experimental data; 2 – approximating function curve

Твердость почвы после уборки тыквы столовой на глубинах от 0,05 до 0,20 м составляла от 0,301 до 1,498 МПа. Однако стоит отметить, что не на всех глубинах твердостный почвенный показатель четко соответствует какой-то одной степени твердости и характеру сложения. Так, на глубине от 0,050 до 0,185 м почва легкая и рыхлая, на глубине от 0,185 до 0,200 м – средняя и рыхловатая.





Р и с. 10. Твердость почвы после уборки лука репчатого:  
 1 – экспериментальные данные; 2 – график аппроксимирующей функции

F i g. 10. Soil hardness after harvesting onions  
 1 – experimental data; 2 – approximating function curve

Твердость почвы после уборки репчатого лука на глубинах от 0,05 до 0,20 м составила от 0,125 до 1,544 МПа. Однако твердостный почвенный показатель, как и в предыдущем случае, варьируется от глубины замеров: на глубине от 0,050 до 0,185 м почва легкая и рыхлая, на глубине от 0,185 до 0,200 м – средняя и рыхловатая.

**Обсуждение и заключение.** Результаты исследования показывают, что в диапазоне исследуемых глубин от 0 до 20 см распределение значений твердости почвы позволяет активно вовлекать в процесс обработки почвы перспективные, высокоэффективные, малогабаритные почвообрабатывающие машины, в частности мотоблок, оснащенный различными тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами (почвенные фрезы, лемешно-отвальный плуг, культиватор и т. д.).

Однако владельцы мотоблоков не имеют приборную базу для определения твердости почвы с целью корректировки своих действий при выборе режимов работы или сменных рабочих адаптеров для осуществления обработки почвы, так как приборы для измерения твердости представляют собой измерительное специализированное, зачастую сложное и дорогостоящее оборудование.

Полученные значения твердости среднесуглинистой серой лесной почвы на глубинах почвенного горизонта от 0 до 20 см в послеуборочный период наиболее распространенных для выращивания в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения Республики Мордовия культур (картофеля, свеклы кормовой, тыквы столовой, репчатого лука) в значительной мере помогают пользователям мотоблоков осуществить технологический процесс на максимально эффективных режимах работы в зависимости от конкретных почвенных условий, что повышает производительность почвообрабатывающих агрегатов.

Дальнейшим развитием проведенного исследования является определение твердости почвы на других типах почвы в весенний период, в момент перед подготовкой почвы к посеву выращиваемых культур в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения, с целью расширения технологических возможностей применяемых почвообрабатывающих машин.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпунин М. Ю., Лашкевич А. К. История развития овощеводства, как отрасли сельскохозяйственного производства и науки на среднем Урале // Вестник биотехнологии. 2023. № 2 (33). URL: <https://bio.urgau.ru/ru/2-33-2023/1-2-2023> (дата обращения: 17.05.2024).
2. Evaluating the Effects of Agricultural Inputs on the Soil Quality of Smallholdings Using Improved Indices / K. Li [et al.] // CATENA. 2022. Vol. 209, Part 1. Article no. 105838. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105838>
3. Старкова О. Я. Обеспеченность земельными ресурсами сельскохозяйственного производства // Агропродовольственная экономика. 2017. № 4. С. 67–73. URL: <http://apej.ru/article/10-04-17> (дата обращения: 11.01.2024).
4. Growing Our Commitment to Promoting Fruits and Vegetables: Looking Beyond the International Year of Fruits and Vegetables 2021 / A. Bersamin [et al.] // Journal of Nutrition Education and Behavior. 2021. Vol. 53, Issue 11. P. 909–910. <https://doi.org/10.1016/j.jneb.2021.09.016>
5. Hettiaratchi D. R. P. The Development of a Powered Low Draught Tine Cultivator // Soil and Tillage Research. 1993. Vol. 28, Issue 2. P. 159–177. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90024-J](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90024-J)
6. Аналитическая оценка рабочих органов для мотоблоков / Г. С. Юнусов [др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 1 (13). С. 62–68. URL: <https://journals.volgatech.net/mkt/article/view/668> (дата обращения: 17.05.2024).
7. Мотоблок с бесступенчатым регулированием поступательной скорости : патент 2602438 Российская Федерация / Купряшкин В. Ф. [и др.]. № 2015122828 ; заявл. 15.06.2015 ; опубл. 20.11.2016. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2602438C1.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).
8. Купряшкин В. Ф., Уланов А. С. Мотоблок «Нева» МБ-23-МУЛЬТИАГРО PRO с модулем для бесступенчатого регулирования скорости его движения и алгоритм его функционирования // Машиноведение. 2019. № 1 (9). С. 114–120. EDN: **AXTPCQ**
9. Адаптивные энергоэффективные рабочие органы для агрегатирования с мотоблоками / А. С. Князьков [и др.] // Сельский механизатор. 2023. № 5. С. 18–19. EDN: **NQMUYU**
10. Жук А. Ф. Комбинированные почвообрабатывающие агрегаты, обоснование, типы, конструкции // Техника в сельском хозяйстве. 1999. № 6. С. 71–74. EDN: **UKRPHP**
11. Соколов В. В., Карпов Н. Ф., Павлюченко Г. В. О ступенчатом изменении ширины захвата почвообрабатывающего машинно-тракторного агрегата // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2004. № 2 (14). С. 180–184. EDN: **PFODCF**
12. An Integrated Inter- and Intra-Row Weeding System for Row Crops / N. S. Chandel [et al.] // Crop Protection. 2021. Vol. 145. Article no. 105642. URL: <https://clck.ru/3DEQ2h> (дата обращения: 17.05.2024).
13. Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П. Моделирование процесса обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 175–191. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>
14. Жданов Ю. М., Петров В. И., Корпушов С. А. Способ и устройство для измерения твердости почвы на разной глубине // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 2 (34). С. 158–161. EDN: **SFFKXD**
15. Лысенков В. О., Безруков А. В., Наумкин Н. И. Классификация технических средств для мониторинга механических свойств почвы // Машиноведение. 2023. № 1 (17). С. 155–161. EDN: **GUNYXL**
16. Field Management Practices Drive Ecosystem Multifunctionality in a Smallholder-Dominated Agricultural System / K. Li [et al.] // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2021. Vol. 313. Article no. 107389. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107389>
17. Applicability of Soil Health Assessment for Wheat-Maize Cropping Systems in Smallholders' Farmlands / J. Zhang [et al.] // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2023. Vol. 353. Article no. 108558. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108558>

18. Петров М. В. Изменение агрофизических свойств почвы в зависимости от основной обработки почвы в различных типах агроландшафта Ульяновской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 1, № 2. С. 67–70. <https://doi.org/10.37313/2782-6562-2022-1-2-67-70>
19. Экспериментальная оценка влияния влажности и типа обработки почвы на уплотняемость при механическом воздействии / И. С. Никулин [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34, № 12. С. 61–65. URL: <http://agroapk.ru/2020-g/190-archive/12-2020/3797-2020-12-10-ru> (дата обращения: 17.05.2024).
20. Яковлев Н. С., Синещков В. Е., Маркин В. В. Анализ систем зяблевой обработки почвы под зерновые культуры // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 5–20. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-5-20>
21. Amsili J. P., van Es H. M., Schindelbeck R. R. Cropping System and Soil Texture Shape Soil Health Outcomes and Scoring Functions // Soil Security. 2021. Vol. 4. Article no. 100012. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100012>
22. Агротехнические и энергетические показатели почвообрабатывающих рабочих органов / Г. Г. Пархоменко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 1. С. 109–126. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.109-126>
23. Федоров С. Е., Бычков М. В. Мониторинг физико-механических свойств почвы // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 3. С. 2. EDN: JFSLLL

## REFERENCES

1. Karpukhin M.Yu., Lashkevich A.K. The History of the Development of Vegetable Growing as a Branch of Agricultural Production and Science in the Middle Urals. *Bulletin of Biotechnology*. 2023;2(33). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://bio.urgau.ru/ru/2-33-2023/1-2-2023> (accessed 17.05.2024).
2. Li K., Wang C., Zhang H., Zhang J., Jiang R., Feng G., et al. Evaluating the Effects of Agricultural Inputs on the Soil Quality of Smallholdings Using Improved Indices. *CATENA*. 2022;209(1):105838. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105838>
3. Starkova O.Ya. Security of Land Resources in Agricultural Production. *Agroprodoval'stvennaya Ekonomika*. 2017;4:67–73. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://apej.ru/article/10-04-17> (accessed 11.01.2024).
4. Bersamin A., Hernández-Garbanzo Y., Atoloye A.T., Gonzalez J.U., Ríos-Castillo I., May Oo T.T., et al. Growing Our Commitment to Promoting Fruits and Vegetables: Looking Beyond the International Year of Fruits and Vegetables 2021. *Journal of Nutrition Education and Behavior*. 2021;53(11):909–910. <https://doi.org/10.1016/j.jneb.2021.09.016>
5. Hettiaratchi D.R.P. The Development of a Powered Low Draught Tine Cultivator. *Soil and Tillage Research*. 1993;28(2):159–177. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90024-J](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90024-J)
6. Iunusov G.S., Maiorov A.V., Anderzhanova N.N., Alibekov S.Ia. Analytical Assessment of Working Elements for Walk-Behind Tractors. *Bulletin of the Volga State University. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2020;1(13):62–68. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journals.volgatech.net/mkt/article/view/668> (accessed 17.05.2024).
7. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., Knjazkov A.S. [Motor Cultivator with Forward Speed Stepless Regulation]. Patent 2,602,438 Russian Federation. 2016 November 20. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://patenton.ru/patent/RU2602438C1.pdf> (accessed 17.05.2024).
8. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S. Motoblock “Neva” MB-23-MULTIAGRO PRO with a Module for Infinitely Variable Speed of its Movements and its Operation Algorithm. *Mashinovedenie*. 2019;1(9):114–120. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: AXTPCQ
9. Knyazkov A.S., Kupryashkin V.F., Chetverov N.A., Kupryashkin V.V. Adaptive Energy-Efficient Working Bodies for Aggregation with Walk-Behind Tractors. *Selskiy Mechanizator*. 2023;5:18–19. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: NQMUYU



10. Zhuk A.F. [Combined Tillage Aggregates, Justification, Types, Designs]. *Tekhnika v sel'skom hozyajstve*. 1999;6:71–74. (In Russ.) EDN: UKRPHP
11. Sokolov V.V., Karpov N.F., Pavlyuchenko G.V. [On the Stepwise Change in the Width of the Grip of a Tillage Machine and Tractor Unit]. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2004;2(14):180–184. (In Russ.) EDN: PFODCF
12. Chandel N.S., Chandel A.K., Roul A.K., Solanke K. An Integrated Inter- and Intra-Row Weeding System for Row Crops. *Crop Protection*. 2021;145:105642. Available at: <https://clck.ru/3DEQ2h> (accessed 17.05.2024).
13. Jabborov N.I., Dobrinov A.V., Saveluev A.P. Modeling of the Soil Tillage Process by Stress Concentration Method in the Treated Reservoir. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):175–191. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>
14. Zhdanov Yu.M., Petrov V.I., Korpushov S.A. [Method and Device for Measuring Soil Hardness at Different Depths]. *Proceedings of the Nizhnevolskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Professional Education*. 2014;2(34):58–161. (In Russ.) EDN: SFFKXD
15. Lysenkov V.O., Bezrukov A.V., Naumkin N.I. Classification of Technical Devices for Monitoring Soil Mechanical Properties. *Machinery Researching*. 2023;1(17):155–161. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: GUNYXL
16. Li K., Zhang H., Li X., Wang C., Zhang J., Jiang R., et al. Field Management Practices Drive Ecosystem Multifunctionality in a Smallholder-Dominated Agricultural System. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021;313:107389. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107389>
17. Zhang J., Li Y., Jia J., Liao W., Amsili J.P., Schneider R.L., et al. Applicability of Soil Health Assessment for Wheat-Maize Cropping Systems in Smallholders' Farmlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023;353:108558. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108558>
18. Petrov M.V. Changes in the Agrophysical Properties of the Soil Depending on the Main Tillage in Various Types of Agricultural Landscape of the Ulyanovsk Region. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022;1(2):67–70 (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37313/2782-6562-2022-1-2-67-70>
19. Nikulin I.S., Mishynin M.V., Nikulicheva T.B., Borodavkin I.G., Titenko A.A. [Experimental Assessment of the Effect of Humidity and Type of Tillage on Compaction under Mechanical Action]. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2020;34(12):61–65. (In Russ.) Available at: <http://agroapk.ru/2020-g/190-archive/12-2020/3797-2020-12-10-ru> (accessed 17.05.2024).
20. Yakovlev N.S., Sineshekov V.E., Markin V.V. Analysis of Ways to Processing the Soil for Cereals Culture. *Bulletin NGIEI*. 2021;4(119):5–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-5-20>
21. Amsili J.P., van Es H.M., Schindelbeck R.R.. Cropping System and Soil Texture Shape Soil Health Outcomes and Scoring Functions. *Soil Security*. 2021;4:100012. <https://doi.org/10.1016/j soi-sec.2021.100012>
22. Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Kambulov S.I., Pahomov V.I. Agrotechnical and Energy Performance of Tillage Tools. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(1):109–126. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.109-126>
23. Fedorov S.E., Bychkov M.V. Monitoring Of Physico-Mechanical Properties Of Soil. *Sovremennye Problemy Territorial'nogo Razvitiya*. 2019;3:2. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: JFSLLZ

Об авторах:

**Уланов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, SPIN-код: 2183-8421, [ulanow.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanow.aleksandr2010@yandex.ru)

**Купряшкин Владимир Федорович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного универси-

тета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, SPIN-код: 1894-9028, kupwf@mail.ru

**Наумкин Николай Иванович**, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, Researcher ID: L-4643-2018, SPIN-код: 8135-7254, naumN@yandex.ru

**Наумкин Дмитрий Анатольевич**, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7752-3424>, Researcher ID: KVA-7171-2024, aeeceaaa2@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, определение методологии исследования, формирование выводов, доработка текста.

А. С. Уланов – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста, визуализация и редактирование.

Н. И. Наумкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

Д. А. Наумкин – литературный и патентный анализ.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 09.07.2024; поступила после рецензирования 25.07.2024; принята к публикации 31.07.2024*

*About the authors:*

**Aleksandr S. Ulanov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery Named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, SPIN-code: 2183-8421, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

**Vladimir F. Kupryashkin**, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery Named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, SPIN-code: 1894-9028, kupwf@mail.ru

**Nikolai I. Naumkin**, Dr.Sci. (Ped.), Cand.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery Named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, Researcher ID: L-4643-2018, SPIN-code: 8135-7254, naumn@yandex.ru

**Dmitry A. Naumkin**, Postgraduate Student of the Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery Named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7752-3424>, Researcher ID: KVA-7171-2024, aeeceaaa2@yandex.ru

*Authors contribution:*

V. F. Kupryashkin – scientific guidance, definition of the study methodology, formation of conclusions, revision of the text.

A. S. Ulanov – conducting experimental researches, processing the experimental results, preparing the initial version of the text, visualizing and editing.

N. I. Naumkin – formulating the basic concept of the study, forming conclusions.

D. A. Naumkin – literary and patent analysis.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 09.07.2024; revised 25.07.2024; accepted 31.07.2024*



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>

EDN: <https://elibrary.ru/dxpwfr>

УДК 631.331:331:62-9

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



## Обоснование параметров работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для селекционной сеялки

А. С. Чулков , М. Е. Чаплыгин, М. М. Шайхов

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
(г. Москва, Российская Федерация)

 [andrei.chulkov@mail.ru](mailto:andrei.chulkov@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Разработка и внедрение автоматизированных и роботизированных машин и устройств для выполнения работ в селекции и семеноводстве зерновых и других культур создают условия для повышения производительности и снижения трудоемкости работ, способствуют наращиванию объемов производства отечественного посевного материала. Для посева культур на втором этапе селекционных работ применяются кассетные сеялки, в которых используются специальные загрузочные устройства для подачи кассет с разделенными на порции семенами к автономным высевальным аппаратам, число которых соответствует числу ячеек в кассете. Роботизированное кассетное загрузочное устройство селекционных сеялок предназначено для последовательного перемещения кассет с семенным материалом к высевальным аппаратам и подачи блоков кассет в рабочую зону по заданной программе при выполнении технологического процесса посева на делянках селекции зерновых, зернобобовых и других культур. При этом должно быть обеспечено строгое согласование работы роботизированного кассетного загрузочного устройства и высевальных аппаратов сеялки, а для этого необходимо обосновать конструктивно-технологические параметры загрузочного устройства с учетом его строения.

**Цель исследования.** Проанализировать работу роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа в системе взаимодействия рабочих органов сеялки при выполнении технологического процесса посева культур на селекционных делянках и обосновать его параметры для загрузки высевальных аппаратов селекционной сеялки.

**Материалы и методы.** Для определения параметров устройства использовали физико-математические зависимости, описывающие его работу в различных режимах при выполнении селекционного посева зерновых и других культур на втором этапе работ.

**Результаты исследования.** Обосновали параметры роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для двух режимов работы: подачи кассет в рабочей зоне к выгрузным отверстиям рабочего стола и подачи блока кассет в рабочую зону. Рассчитаны параметры механизмов манипулятора: для актуатора, перемещающего кассеты, минимальное усилие составляет 7,2 Н, длина штока – 700 мм, скорость штока – 60 мм/с; для электродвигателя, вращающего подвижную платформу устройства, частота вращения выходного вала составляет 10 об/мин, минимально необходимая мощность на выходном валу привода подвижной платформы – 55,7 Вт.

**Обсуждение и заключение.** Определены конструктивно-технологические параметры роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для загрузки высевальных аппаратов селекционной сеялки на втором этапе селекционных работ. Проведен расчет скорости подачи кассет, которая составляет 0,033 м/с во время основной операции выполнения посева для исходных параметров: рабочей

© Чулков А. С., Чаплыгин М. Е., Шайхов М. М., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

скорости движения сеялки 3,0 км/ч, длины деланки 1 м и длины межъярусной дорожки 0,5 м. Для режима подачи блока кассет рассчитали угловую скорость вращения подвижной платформы ( $1,05 \text{ с}^{-1}$ ), при которой подача блока кассет будет происходить за 1 с.

**Ключевые слова:** посев зерновых культур, селекция, кассетная селекционная сеялка, роботизированное кассетное загрузочное устройство, манипулятор, блок кассет

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности:** авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

**Для цитирования:** Чулков А. С., Чаплыгин М. Е., Шайхов М. М. Обоснование параметров работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для селекционной сеялки // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 549–562. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>

## Justifying the Operation Parameters of a Robotic Cassette Loading Device of the Carousel Type for a Selection Seeder

A. S. Chulkov✉, M. E. Chaplygin, M. M. Shaykhov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

✉ [andrei.chulkov@mail.ru](mailto:andrei.chulkov@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The development and implementation of automated and robotic machines and devices for performing works on selection and seed production of grain and other crops creates conditions for increasing productivity and reducing labor intensity of work and contributes to increasing the production volume of domestic crop seeds. For sowing crops at the 2nd stage of selection work, there are used cassette seeders, which have special loading devices for feeding cassettes with seeds divided into portions to autonomous seeding units, the number of which corresponds to the number of cells in the cassette. The robotic cassette loading device of selection seeders is designed for successive movement of cassettes with seeds to the seeding units and for feeding cassette blocks to the working area according to a specified program when performing the technological process of sowing on seed plots for breeding grain, leguminous and other crops. In this case, there must be ensured strict coordination of the robotic cassette loading device and seeder seeding units operation and for this it is necessary to justify the engineering parameters of the robotic cassette loading device taking into account its design.

**Aim of the Study.** The study is aimed at analyzing the robotic cassette loading device operation in the interaction system between the seeder working parts during the technological process of sowing crops on selection breeding plots and justifying the parameters of the robotic cassette loading device of the carousel type for loading the selection seeder seeding units.

**Materials and Methods.** To determine the parameters of the robotic cassette loading device, there were used physical and mathematical dependencies describing the operation of the robotic cassette loading device in various modes during selection sowing of grain and other crops at the second stage of work.

**Results.** There were substantiated the parameters of the robotic cassette loading device of the carousel type for two operating modes: feeding cassettes in the working area to the discharge outlets of the work table and feeding a block of cassettes into the working area. There were calculated parameters of the manipulator mechanisms. For the actuator moving the cassettes, the minimum force is 7.2 N, the rod length is 700 mm, the rod speed is 60 mm/s, and for the electric motor rotating the robotic cassette loading device moving platform, the rotation frequency of the output shaft is 10 r/pm, the minimum required power on the output shaft of the moving platform drive is 55.7 W.



*Discussion and Conclusion.* There were determined the engineering parameters of the robotic cassette loading device of the carousel type for loading the seeding units of a selection seeder at the 2nd stage of selection work. The calculation of the cassette feed speed of 0.033 m/s during the main sowing operation was carried out for the initial parameters: the seeder operating speed of 3.0 km/h, the plot length of 1 m and the length of the inter-tier path 0.5 m. For the cassette block feed mode, there was calculated the angular velocity of rotation of the moving platform (1.05 radians per second), at which the cassette block feed will take 1 second.

**Keywords:** sowing of grain crops, selection, cassette selection seeder, robotic cassette loading device, manipulator, block cassette

**Conflict of interest:** The authors declare no conflicting interests.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to anonymous reviewers.

**For citation:** Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Justification of the Operation Parameters of a Robotic Cassette Loading Device of the Carousel Type for a Selection Seeder. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):549–562. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>

**Введение.** Для выполнения работ в селекции и семеноводстве зерновых и других культур в сельскохозяйственном производстве осуществляется создание и распространение автоматизированных и роботизированных машин и устройств, что приводит к повышению производительности и снижению трудоемкости работ, способствует наращиванию объемов производства отечественного посевного материала. Разработка и применение новых селекционных сеялок с элементами роботизации технологического процесса должны обеспечить более качественное выполнение посева зерновых и других культур в селекционных и семеноводческих питомниках, уменьшение трудоемкости посева делянок [1–3].

Кассетные сеялки применяются для посева культур на 2-м этапе селекционных работ. Они имеют специальные загрузочные устройства для подачи кассет с разделенным на порции высеваемым материалом (семенами) к автономным высевальным аппаратам, число которых соответствует числу ячеек в кассете и общему числу рядков на делянке. Роботизированное кассетное загрузочное устройство (РКЗУ) селекционных сеялок предназначено для последовательного перемещения кассет с семенным материалом к высевальным аппаратам сеялки и подачи блоков кассет в рабочую зону по заданной программе при выполнении технологического процесса посева на делянках селекции зерновых, зернобобовых и других культур.

Целью исследования является анализ работы РКЗУ карусельного типа для загрузки высевальных аппаратов селекционной сеялки в системе взаимодействия рабочих органов сеялки при выполнении технологического процесса посева зерновых и других культур на селекционных делянках, а также обоснование параметров РКЗУ для основных режимов его работы.

**Обзор литературы.** На 2-м этапе селекции зерновых и зернобобовых культур для выполнения технологии посева применяют кассетные селекционные сеялки с порционными высевальными аппаратами автономного посева [4–6]. В конструкции указанных аппаратов применяется конус для равномерного распределения подаваемой в устройство порции семян вдоль его основания. При выполнении



посева каждая порция семян равномерно распределяется вдоль отдельного ряда засеваемой делянки. Загрузка семян в конусные высевальные аппараты осуществлялась при помощи кассетного загрузочного устройства, перестановку блоков кассет в которых осуществлял оператор вручную [7–9]. Для загрузки высевальных аппаратов семенами предложено применять РКЗУ карусельного типа, что позволит повысить производительность сеялки по сравнению с ранее применявшимися сеялками с кассетным загрузочным устройством и снизить трудоемкость за счет сокращения ручного труда при работе РКЗУ [10–12].

РКЗУ может быть интегрировано как в отечественные кассетные сеялки (типа СКС-6-10, СССэ-6 и др.<sup>1</sup>), так и в сеялки зарубежной разработки компаний Wintersteiger Ag (Австрия), Haldrup (Германия) и др. [13–15].

**Материалы и методы.** Обоснование параметров РКЗУ карусельного типа провели с использованием физико-математического аппарата [16–18].

На основе принципиальной схемы (рис. 1) устройства по патенту РФ на изобретение № 2806909 разработаны алгоритм работы РКЗУ (рис. 2) и схемы для расчета параметров РКЗУ для двух режимов его работы (рис. 3, 4) [14].

Конструктивно-технологическая схема РКЗУ карусельного типа разработана в соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012<sup>2</sup> и ОСТ 46 73-78<sup>3</sup>. При разработке схемы устройства применили структурный подход, основанный на разбиении роботизированного устройства на блоки по функциональному признаку, когда каждый блок выполняет отдельную функцию<sup>4</sup>.

**Результаты исследования.** Роботизированное кассетное устройство для загрузки высевальных аппаратов предназначено для установки на селекционную сеялку с целью посева зерновых, зернобобовых и других культур на 2-м этапе селекционных работ [9; 14; 15]. Согласно ОСТ 46 73-78 на данном этапе работ длина делянки  $L_d$  составляет от 1 до 5 м, длина междурядной дорожки  $L_{мя}$  – не более 2 м.

Схема устройства по патенту РФ на изобретение № 2806909 «Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа селекционной сеялки» [14] представлена на рисунке 1.

РКЗУ карусельного типа работает в двух режимах в соответствии с алгоритмом (рис. 2):

- режим подачи кассет в рабочей зоне к выгрузным отверстиям рабочего стола (поступательное движение кассет);
- режим подачи блока кассет в рабочую зону (вращательное движение подвижной платформы с установленными на ней блоками кассет).

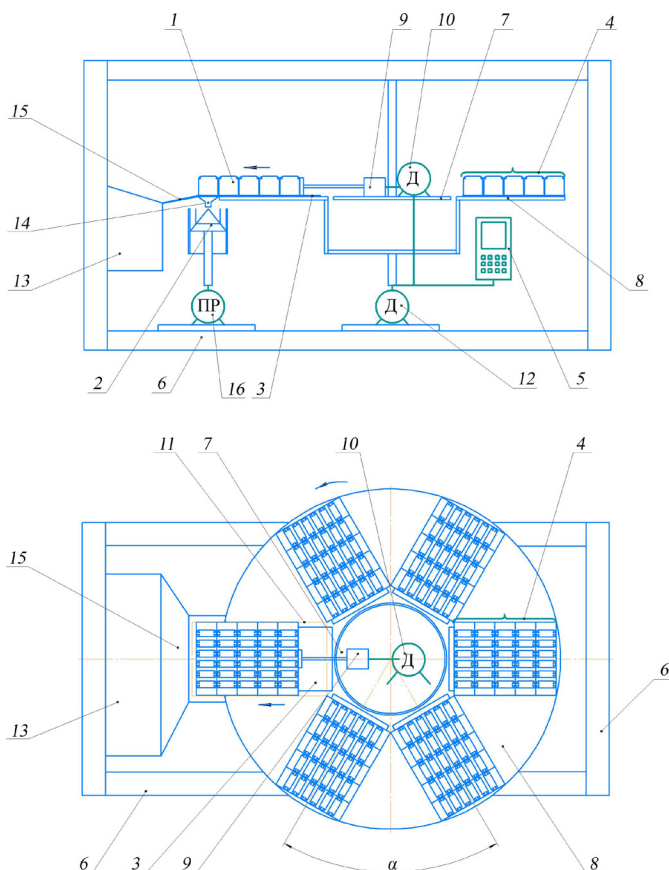
<sup>1</sup> Анискин В. И., Некипелов Ю. Ф. Механизация опытных работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых и зернобобовых культур. М. : ВИМ, 2004. 200 с.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2019. 31 с. URL: <https://meganorm.ru/Data/707/70723.pdf> (дата обращения: 12.06.2024).

<sup>3</sup> ОСТ 46 73-78. Рекомендации по применению терминов и определений в области механизации работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых и зернобобовых культур. М. : Колос, 1979. 32 с.

<sup>4</sup> Проектирование роботов и робототехнических систем : учебное пособие / В. Х. Пшихопов [и др.]. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2014. 196 с.

*Определение конструктивно-технологических параметров для режима подачи кассет в рабочей зоне к выгрузным отверстиям. Схема для расчета параметров подачи кассет к выгрузным отверстиям представлена на рисунке 3.*



Р и с. 1. Принципиальная схема РКЗУ карусельного типа (вид сбоку и сверху):  
 1 – кассета с ячейками для высеваемого материала; 2 – высевающий аппарат; 3 – направляющая пластина; 4 – кассетный блок; 5 – блок управления; 6 – рама; 7 – центральная неподвижная платформа; 8 – внешняя подвижная платформа; 9 – актуатор; 10 – электродвигатель привода актуатора; 11 – рабочая зона перемещения кассет; 12 – электродвигатель привода внешней подвижной платформы; 13 – контейнер для сбора пустых кассет; 14 – рабочий стол с выгрузными отверстиями; 15 – наклонный лоток для спуска пустых кассет; 16 – привод высевающего аппарата

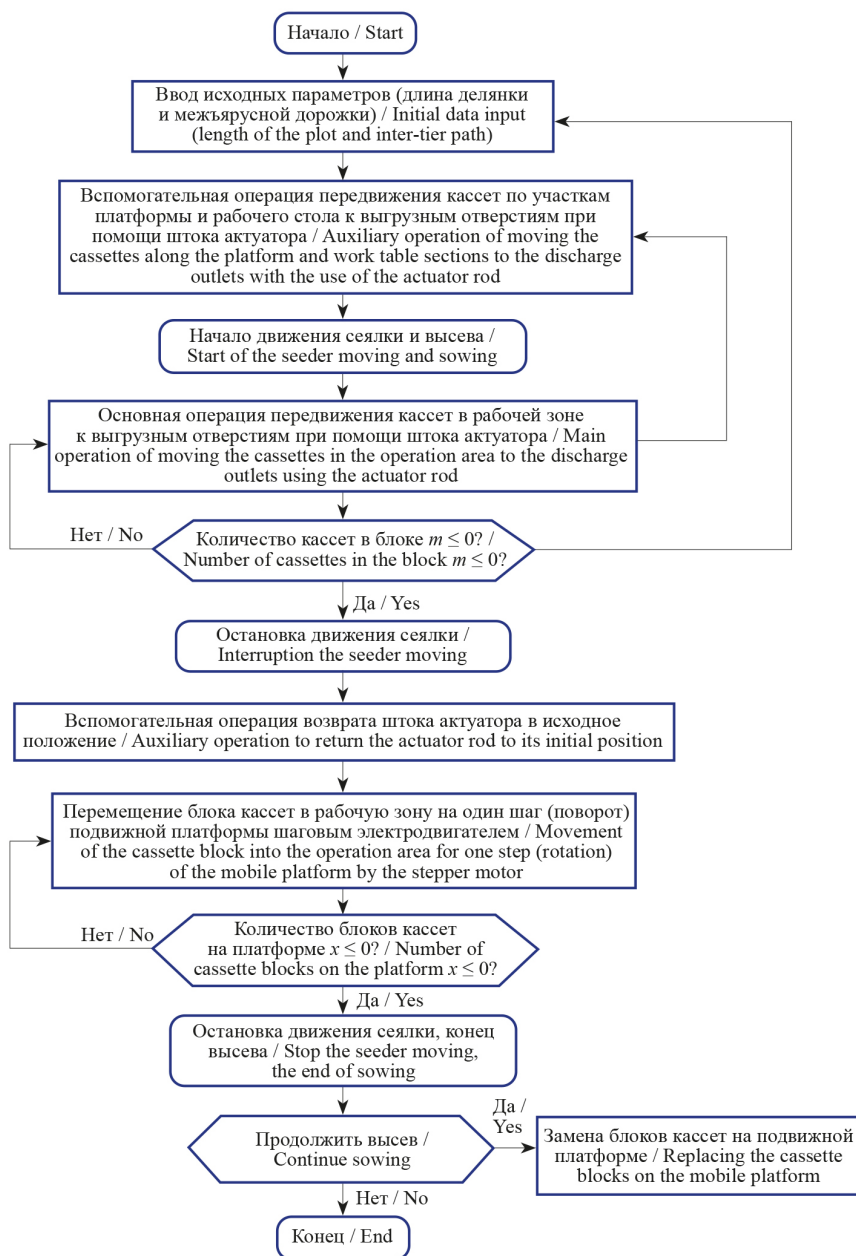
F i g. 1. Schematic diagram of a carousel-type robotic cassette loading device (RCLD) (top and side views):  
 1 – cassette with cells for the material to be sown; 2 – sowing device; 3 – guide plate; 4 – cassette block;  
 5 – control unit; 6 – frame; 7 – central fixed platform; 8 – external movable platform; 9 – actuator;  
 10 – actuator drive electric motor; 11 – operation area for moving cassettes; 12 – electric motor for driving the external moving platform; 13 – container for collecting empty cassettes; 14 – work table with discharge outlets; 15 – inclined tray for lowering empty cassettes; 16 – sowing device drive

*Примечание:* Д – электродвигатель; ПП – привод.

*Note:* Д – electric motor; ПП – drive.

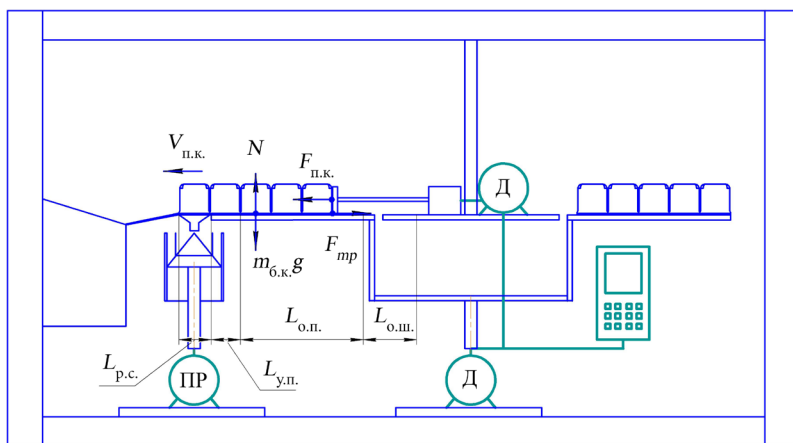
*Источник:* рисунок составлен авторами статьи по материалам патента на изобретение № 2806909 [14].

*Source:* the diagram is compiled by the authors of the article based on the materials of the patent for invention No. 2806909 [14].



Р и с. 2. Алгоритм работы РКЗУ карусельного типа  
 F i g. 2. Algorithm of operation of a RCLD of a carousel type

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.  
 Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.



Р и с. 3. Схема для расчета параметров подачи кассет к выгрузным отверстиям  
 F i g. 3. Scheme for calculating the parameters for feeding cassettes to the discharge outlets

Операцию подачи кассет в рабочей зоне к выгрузным отверстиям разделили на три: основную и две вспомогательных.

Первая вспомогательная операция предшествует началу посева и выполняется до движения сеялки по делянке, при этом должно быть обеспечено перемещение кассет штоком актуатора:

$$L_{в1} = L_{о.ш.} + L_{у.п.} + L_{п.с.},$$

где  $L_{о.ш.}$  – длина перемещения штока актуатора от исходного положения в пределах центральной неподвижной платформы до начала рабочей зоны, равная величине его отвода от начала рабочей зоны до исходного положения во избежание столкновения со следующим подаваемым в рабочую зону блоком кассет,  $L_{о.ш.} \geq 100$  мм;  $L_{у.п.}$  – длина переходного участка платформы между направляющей пластиной и рабочим столом,  $L_{у.п.} \leq 50$  мм;  $L_{п.с.}$  – длина рабочего стола с выгрузными отверстиями,  $L_{п.с.} = 225$  мм. Примем  $L_{в1} = 100 + 50 + 225 = 375$  мм.

Основная операция подачи кассет в рабочей зоне к выгрузным отверстиям, под усилием штока актуатора, происходит во время прохождения сеялкой нескольких делянок и межъярусных дорожек. При этом крайняя, контактирующая со штоком, кассета перемещается во время операции посева на расстояние:

$$L_{о.п.} = B \cdot m,$$

где  $B$  – ширина кассеты,  $B = 60$  мм = 0,06 м;  $m$  – количество кассет в блоке для представленной конструкции,  $m = 5$  шт. Тогда  $L_{о.п.} = 60 \cdot 5 = 300$  мм.

Вторая вспомогательная операция включает в себя возврат штока актуатора в исходное положение перед подачей следующего блока кассет с семенами. При этом шток перемещается на величину:

$$L_{в2} = L_{п.с.} + L_{у.п.} + L_{о.п.} + L_{о.ш.}. \quad (1)$$

По формуле (1):  $L_{в2} = 225 + 50 + 300 + 100 = 675$  мм.

Необходимая длина выдвижения штока  $L_{ш}$  определяется величиной  $L_{в2} = 675$  мм и расположением корпуса актуатора на неподвижной платформе. Приняли  $L_{ш} = 700$  мм.

*Оценка усилия на передвижение кассет по направляющей пластине и другим элементам конструкции РКЗУ.* При выполнении основной операции подачи кассет с семенами в рабочей зоне к выгрузным отверстиям кассеты скользят по направляющей пластине и далее по участкам подвижной платформы и рабочего стола.

Необходимое усилие  $F_{п.к.}$ , Н, на передвижение кассет можно определить с помощью оценки силы трения  $F_{тр.}$ , Н, скольжения по формуле:

$$F_{п.к.} \approx F_{тр.} = \mu_{ABS} \cdot N, \quad (2)$$

где  $\mu_{ABS}$  – коэффициент трения скольжения (материал кассет, направляющих пластин, подвижной платформы РКЗУ и рабочего стола – ABS-пластик; приняли  $\mu_{ABS} = 0,54$ );  $N$  – нормальная реакция опоры, Н:

$$N = m_{б.к.} \cdot g, \quad (3)$$

где  $m_{б.к.}$  – масса пяти загруженных семенами кассет,  $m_{б.к.} = 1,36$  кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g \approx 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Из формулы (2), с учетом (3), определили оценку усилия на передвижение кассет с семенами при их подаче к выгрузным отверстиям:  $F_{п.к.} \approx 7,2$  Н.

*Определение необходимой скорости подачи кассет при непрерывном движении по направляющей пластине к выгрузным отверстиям рабочего стола.* Указанная величина должна быть согласована с рабочей скоростью движения сеялки по деланке и межъярусной дорожке и работой высевающего аппарата.

Учитывали, что рабочая скорость движения сеялки  $v_c$  по деланке варьируется (для сеялки СКС-6-10 рекомендуемая скорость 1,15 км/ч согласно ТУ 46-16-466-83, для сеялки СССэ-6 – до 3,0 км/ч) [8]. Приняли указанные значения скоростей для дальнейших исследований конструктивно-технологических параметров РКЗУ карусельного типа.

Выполнили расчет скорости подачи кассет для значений исходных параметров: минимальной длины деланки  $L_d = 1$  м (согласно ОСТ 46 73-78); длины межъярусной дорожки  $L_{мя} = 0,5$  м; максимальной рабочей скорости движения сеялки  $v_c = 3,0$  км/ч  $\approx 0,83$  м/с. При большей длине деланок и межъярусных дорожек и меньшей рабочей скорости движения сеялки во время выполнения основной операции посева для обеспечения работы РКЗУ на посеве 2-го этапа селекционных работ (согласно ОСТ 46 73-78) скорость перемещения штока актуатора (подачи кассет) может быть меньше.

Параметры работы высевающего аппарата сеялки и подачи кассет РКЗУ должны быть согласованы по времени. Время засева деланки:

$$t_d = L_d / v_c. \quad (4)$$

При длине деланки  $L_d = 1$  м по формуле (4) получили:  $t_d = 1 / 0,83 \approx 1,2$  с. Время прохождения сеялкой межъярусной дорожки:

$$t_{\text{мя}} = L_{\text{мя}} / v_c. \quad (5)$$

При длине межъярусной дорожки  $L_{\text{мя}} = 0,5$  м по формуле (5):

$$t_{\text{мя}} = 0,5 / 0,83 \approx 0,6 \text{ с.}$$

Суммарное время засева делянки и прохождения сеялкой межъярусной дорожки:

$$t_{\text{д.мя}} = t_{\text{д}} + t_{\text{мя}}. \quad (6)$$

По формуле (6):  $t_{\text{д.мя}} \approx 1,2 + 0,6 = 1,8$  с.

Скорость подачи кассеты во время основной операции подачи кассет в рабочей зоне к выгрузным отверстиям при прохождении сеялкой делянки и межъярусной дорожки:

$$v_{\text{п.к.}} = B / t_{\text{д.мя}},$$

где  $B$  – длина пути прохождения кассеты к выгрузным отверстиям, равная ширине кассеты,  $B = 60$  мм = 0,06 м. Тогда  $v_{\text{п.к.}} = 0,06 / 1,8 = 0,033$  м/с.

Выдвижение и возврат штока в исходное положение на вспомогательных операциях во время остановки сеялки необходимо выполнять максимально быстро, чтобы время остановки было минимальным. При этом скорость выдвижения и возврата штока  $v_{\text{в.ш.}}$  на вспомогательных операциях должна удовлетворять условию:

$$v_{\text{в.ш.}} \geq v_{\text{п.к.}}. \quad (7)$$

Поэтому с учетом условия (7) для расчетов приняли  $v_{\text{в.ш.}} = 60$  мм/с. При этой скорости возврат штока в исходное положение при перемещении на  $L_{\text{в2}} = 675$  мм происходит за время  $t_{\text{в.ш.}} \approx 11,3$  с.

Актуатор для перемещения кассет подбирается по следующим основным параметрам: усилию 7,2 Н; длине штока  $L_{\text{ш}} = 700$  мм; скорости выдвижения и возврата штока  $v_{\text{в.ш.}} = 60$  мм/с.

*Определение параметров для режима подачи блока кассет в рабочую зону при вращении подвижной платформы РКЗУ карусельного типа.* Усилие  $F_{\text{п}}$  сопротивления вращению подвижной платформы оценили по формуле:

$$F_{\text{п}} = \mu \cdot N_{\text{п}}, \quad (8)$$

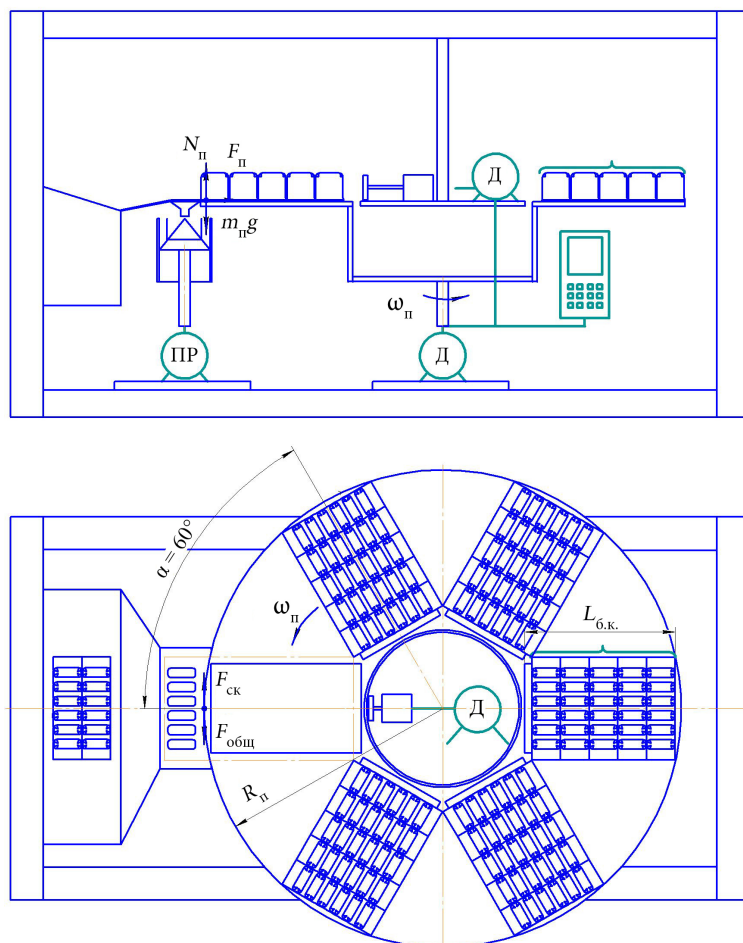
где  $\mu$  – коэффициент трения стального вала электродвигателя в опоре, на которой закреплена подвижная платформа,  $\mu = 0,3$ ;  $N_{\text{п}}$  – нормальная реакция опоры подвижной платформы с установленными на ней блоками кассет с семенами, Н:

$$N_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot g, \quad (9)$$

где  $m_{\text{п}}$  – масса подвижной платформы с установленными на ней блоками кассет с семенами, кг;  $m_{\text{п}} = 30,0$  кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

По формуле (8), с учетом (9), получили:  $F_{\text{п}} = 88,29$  Н.

Схема для расчета параметров в режиме подачи блока кассет представлена на рисунке 4.



Р и с. 4. Схема для расчета параметров РКЗУ карусельного типа для режима подачи блока кассет при вращении подвижной платформы (вид сбоку и сверху)

Fig. 4. Scheme for calculating the parameters of a carousel-type RCLD for the feeding mode of a cassette block during rotation of the moving platform (top and side views)

По команде блока управления подвижная платформа должна начать вращение и переместить блоки кассет на один шаг – угол  $\alpha = 60^\circ$  (при равномерном распределении блоков кассет вдоль края подвижной платформы для шестиблочного РКЗУ карусельного типа).

Поворот платформы на один шаг необходимо выполнять максимально быстро, чтобы время остановки сеялки было минимальным. Приняли время подачи нового заполненного семенами блока кассет в рабочую зону  $t_{п.п.} = 1$  с. При этом частота выходного вала электродвигателя (вращения подвижной платформы)  $n_{п.}$ , об/с определяется по формуле:

$$n_{п.} = (t_{п.п.})^{-1} / 6. \tag{10}$$

Получено по формуле (10):  $n_n \approx 0,167$  об/с (соответствует 10 об/мин).  
Угловая скорость на выходном валу привода  $\omega_n$ ,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot n_n. \quad (11)$$

По формуле (11):  $\omega_n \approx 2 \cdot 3,14 \cdot 0,167 \approx 1,05 \text{ с}^{-1}$ .

Мощность на выходном валу привода подвижной платформы определяли по формуле:

$$N_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} \cdot \omega_n, \quad (12)$$

где  $M_{\text{пр}}$  – крутящий момент на выходном валу привода, Н·м;  $\omega_n$  – угловая скорость вращения выходного вала привода (платформы РКЗУ),  $\text{с}^{-1}$ .

Крутящий момент на выходном валу привода рассчитали по формуле:

$$M_{\text{пр}} = F_n \cdot R_n, \quad (13)$$

где  $F_n$  – усилие сопротивления вращению подвижной платформы, Н;  $R_n$  – внешний радиус подвижной платформы, м;  $R_n = 0,6$  м.

По формулам (12) и (13) получили:

$$M_{\text{пр}} = 88,29 \cdot 0,6 \approx 53,0 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$N_{\text{пр}} = 53,0 \cdot 1,05 \approx 55,7 \text{ Вт}.$$

По численному значению  $N_{\text{пр}}$ , по каталогу выбирается величина  $N_n$  – номинальная мощность электродвигателя, исходя из условия  $N_{\text{пр}} \leq N_n$ .

Таким образом, рассчитаны параметры для электродвигателя, вращающего подвижную платформу РКЗУ с шагом  $60^\circ$ , – частота вращения вала 10 об/мин, угловая скорость  $1,05 \text{ с}^{-1}$ .

**Обсуждение и заключение.** Определены конструктивно-технологические параметры РКЗУ карусельного типа для загрузки высевających аппаратов селекционной сеялки на 2-м этапе селекционных работ. Проведен расчет скорости подачи кассет  $0,033$  м/с во время основной операции выполнения посева для исходных параметров – рабочей скорости движения сеялки  $3,0$  км/ч, длины деланки  $1$  м и длины межъярусной дорожки  $0,5$  м. Для режима подачи блока кассет определили угловую скорость вращения подвижной платформы, равную  $1,05 \text{ с}^{-1}$ , при которой подача блока кассет будет происходить за  $1$  с. Рассчитаны параметры механизмов манипулятора: для актуатора, перемещающего кассеты, минимальное усилие  $7,2$  Н, длина штока  $700$  мм, скорость штока  $60$  мм/с; для электродвигателя, вращающего подвижную платформу РКЗУ, частота вращения выходного вала  $10$  об/мин, минимально необходимая мощность на выходном валу привода подвижной платформы  $55,7$  Вт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6–10. EDN: YFRZDV
2. Измайлов А. Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536–538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>



3. Жалнин Э. В. Семеноводство России – приоритет импортозамещения // Сельский механизатор. 2016. № 3. URL: <https://selmech.msk.ru/316.html> (дата обращения: 17.04.2024).
4. Несмиян А. Ю., Ценч Ю. С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 3. С. 45–52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52>
5. Автоматизированные технические средства в посевной технике для селекции и семеноводства сельхозкультур / А. Х. Текушев [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 3. С. 49–55. EDN: SEESLE
6. Измайлов А. Ю., Евтюшенков Н. Е. Приоритетная техника для селекции и первичного семеноводства // Сельский механизатор. 2017. № 3. URL: <http://www.selmech.msk.ru/317.html> (дата обращения: 17.04.2024).
7. Кассетные загрузочные устройства для высевających аппаратов селекционных сеялок / А. С. Чулков [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 2. С. 74–81. EDN: TUJELT
8. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the Construction of a Self-Propelled Selection Seeder with an Intelligent Seeding System // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. Article no. 05011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405011>
9. Чулков А. С., Шибряева Л. С. Параметры кассеты для роботизированного загрузочного устройства селекционной сеялки // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 2. С. 92–97. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-92-97>
10. Жалнин Э. В. Возродим селекцию и семеноводство // Сельский механизатор. 2014. № 7. С. 4–5. EDN: SVKVRH
11. Научно-технические достижения агроинженерных научных учреждений для производства основных групп сельскохозяйственной продукции / Ю. Ф. Лачуга [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 4 (286). С. 2–11. EDN: LAQWUU
12. Лобачевский Я. П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94, № 3. С. 275–282. EDN: GFXGCD
13. Инновационные достижения агроинженерных научных учреждений в условиях развития цифровых систем в сельском хозяйстве / Я. П. Лобачевский [и др.] // Техника и оборудование для села. 2024. № 5(323). С. 2–9. EDN: IZLBHP
14. Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа для селекционной сеялки : патент 2806909 Российская Федерация / Чулков А. С., Чапыгин М. Е., Шайхов М. М. № 2023112652 ; заявл. 25.05.2023 ; опубл. 08.11.2023. EDN: GBKTEM
15. Чулков А. С., Шайхов М. М. Роботизированное кассетное загрузочное устройство конвейерного типа для селекционной сеялки // Техника и оборудование для села. 2024. № 6 (324). С. 20–22. EDN: ZMIJSQ
16. Yaropud V., Datsiuk D. By Improving Breeding Seeder Sowing Device Small Seeded Crops // Vibrations in Engineering and Technology. 2021. No.1. P. 152–162. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-15>
17. Theory of Movement of the Combined Seeding Unit / H. Beloev [et al.] // Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2015. Vol. 7. P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.024>
18. Современные физические методы и технологии в сельском хозяйстве / С. В. Гудков [и др.] // Успехи физических наук. 2024. Т. 194, № 2. С. 208–226. EDN: QINIEQ

## REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YFRZDV
2. Izmaylov A.Yu. Smart Technologies and Robotic Means in Agricultural Production. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2019;89(5):536–538. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>



3. Zhalnin E.V. Russian Seed Production – The Priority of Import Substitution. *Selskiy Mechanizator*. 2016;3. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://selmech.msk.ru/316.html> (accessed 17.04.2024).
4. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendencies and Prospects for the Development of Domestic Machinery for Sowing Grain Crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018;12(3):45–52. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52>
5. Tekushev A.Kh., Chaplygin M.E., Chulkov A.S., Shaykhov M.M. The Automated Technical Means in Sowing Equipment for Breeding and Seed Production of Agricultural Crops. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2022;69(3):49–55. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: SEESLE
6. Izmailov A.Yu., Evtyuchenkov N.E. Priority Appliances for Breeding and Primary Seed Production. *Selskiy Mechanizator*. 2017;3. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.selmech.msk.ru/317.html> (accessed 17.04.2024).
7. Chulkov A.S., Shaykhov M.M., Chaplygin M.E., Tekushev A.Kh. Cassette Loading Units for Hanging Devices of Breeding Seeders. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023;70(2):74–81. EDN: TUJELT
8. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the Construction of a Self-Propelled Selection Seeder with an Intelligent Seeding System. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:05011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405011>
9. Chulkov A.S., Shibryaeva L.S. Parameters of a Robotic Loading Device for Selection Seeder. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):92–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-92-97>
10. Zhalnin E.V. Revive Breeding and Seed Production. *Selskiy Mechanizator*. 2014;7:4–5. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: SVKVRH
11. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogenov Yu.Kh. Scientific and Technical Results of Agro-Engineering Scientific Institutions for the Production of Main Groups of Agricultural Products. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;4(286):2–11. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LAQWUU
12. Lobachevsky Ya.P. Scientific Support of Priority Technologies Agro-Industrial Complex of the Russian Federation. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2024;94(3):275–282. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: GFXGCD
13. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Innovative Achievements of Agricultural Engineering Scientific Institutions in the Context of the Development of Digital Systems in Agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;5(323):2–9. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: IZLBHP
14. Chulkov A.S., Shaikhov M.M., Chaplygin M.E. Robotic Cassette Loading Device of Carousel Type for Selection Seeder. Patent 2806909 Russian Federation. 2023 November 8. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: GBKTEM
15. Chulkov A.S., Shaikhov M.M. Conveyor-Type Robotic Cassette Loading Device for a Selection Seeder. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;6(324):20–22. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZMIJSQ
16. Yaropud V., Datsiuk D. By Improving Breeding Seeder Sowing Device Small Seeded Crops. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2021;1:152–162. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-15>
17. Beloev H., Borisov B., Adamchuk V., Petrychenko I. Theory of Movement of the Combined Seeding Unit. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015;7:21–26. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.024>
18. Gudkov S.V., Sarimov R.M., Astashev M.E., Pishchalnikov R.Yu., Yanykin D.V., Simakin A.V., et al. Modern Physical Methods and Technologies in Agriculture. *Physics-USpekhi*. 2024;194(2):208–226. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QINIEQ

Об авторах:

**Чулков Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация,

г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>, Researcher ID: JOZ-1910-2023, SPIN-код: 1726-9749, andrei.chulkov@mail.ru

**Чаплыгин Михаил Евгеньевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, Scopus ID: 57211741695, SPIN-код: 2268-6927, misha2728@yandex.ru

**Шайхов Марсель Марселевич**, ведущий специалист лаборатории технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9959-8474>, SPIN-код: 1076-9502, mars.shaihov@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

А. С. Чулков – формулирование основных целей и задач исследования, составление начального варианта статьи, формирование общих выводов.

М. Е. Чаплыгин – доработка текста и оформление материалов, анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая доработка статьи.

М. М. Шайхов – методология, анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая доработка статьи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 03.09.2024; поступила после рецензирования 18.09.2024; принята к публикации 25.09.2024*

*About the authors:*

**Andrey S. Chulkov**, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Breeding and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>, Researcher ID: JOZ-1910-2023, SPIN-code: 1726-9749, andrei.chulkov@mail.ru

**Mikhail E. Chaplygin**, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Breeding and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, Scopus ID: 57211741695, SPIN-code: 2268-6927, misha2728@yandex.ru

**Marsel' M. Shaykhov**, Leading Specialist of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Breeding and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9959-8474>, SPIN-code: 1076-9502, mars.shaihov@yandex.ru

*Authors contribution:*

A. S. Chulkov – writing the main goals and objectives of the study, writing the initial draft, writing general conclusions, final processing of the manuscript.

M. E. Chaplygin – revision of the manuscript and design of materials, analysis of literary sources, writing general conclusions, final processing of the manuscript.

M. M. Shaykhov – methodology, analysis of literary sources, writing general conclusions, final processing of the manuscript.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 03.09.2024; revised 18.09.2024; accepted 25.09.2024*



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>

EDN: <https://elibrary.ru/fxvrmf>

УДК 630\*232.332.44:631.544.2

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



## Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов

А. Ю. Брюханов<sup>1</sup>, А. А. Романовская<sup>2</sup>, Е. В. Шалавина<sup>1</sup>✉,  
Э. В. Васильев<sup>1</sup>, В. Ю. Вертянкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ*

(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

<sup>2</sup> *Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля*

(г. Москва, Российская Федерация)

✉ [shalavinaev@mail.ru](mailto:shalavinaev@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Одним из значимых источников антропогенных выбросов является аграрный сектор. Корректный учет эмиссии парниковых газов в этом секторе зависит от применяемых технологий переработки навоза и помета. На сегодняшний день отмечается недостаток исследований по уточнению выбросов метана и закиси азота от существующих систем хранения навоза и помета ввиду разнообразия используемых соответствующих технологий, поэтому разработанный методический подход к расчетной оценке годовой эмиссии метана и закиси азота является актуальным.

**Цель исследования.** Определить влияние технологий переработки навоза и помета на годовые эмиссии метана и закиси азота.

**Материалы и методы.** Для определения эмиссии закиси азота и метана рассчитана масса получаемого навоза и помета, содержание в нем общего азота и углерода; проанализированы технологии переработки навоза: длительное выдерживание навоза/помета, пассивное компостирование, активное компостирование, биоферментация, сушка и грануляция, сжигание. Выполнен расчет для двух вариантов: 1) по данным Национального кадастра антропогенных выбросов с учетом доли навоза, перерабатываемой каждой технологией за 2022 г.; 2) по фактическим данным распределения технологий за 2022 г. Выполнена прогнозная оценка на период до 2030 г. Исследования выполнены на примере субъектов Северо-западного федерального округа РФ.

**Результаты исследования.** Проанализированы технологии содержания животных и птицы на трех типах предприятий: сельскохозяйственные организации, крестьянско-фермерские хозяйства, хозяйства населения. Рассчитана масса навоза и помета для каждого типа предприятий и проанализированы технологии переработки, определена доля навоза, перерабатываемая по каждой технологии. Рассчитаны эмиссии метана и закиси азота на примере Северо-западного федерального округа с пересчетом на CO<sub>2</sub> эквивалент для 2022 г.

**Обсуждение и заключение.** Определено влияние технологий сбора и хранения навоза на выбросы метана и закиси азота. Полученные значения превышают по метану на 35,6 % и закиси азота на 14,2 % значения, рассчитанные по методологии, используемой в Национальном кадастре, что говорит о целесообразности ее уточнения. Категорирование предприятий позволяет упростить расчет при оценках на уровне регионов и страны. Уточненные данные об используемых технологиях сбора

© Брюханов А. Ю., Романовская А. А., Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Вертянкина В. Ю., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

и хранения навоза и присущих им эмиссиях позволят проводить прогнозные расчеты и определять возможные направления технико-технологической модернизации, направленной на снижение выбросов парниковых газов.

**Ключевые слова:** эмиссии парниковых газов, метан, закись азота, животноводство, технологии переработки навоза и помета, азот, углерод

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** определение количественных и качественных характеристик навоза и помета для трех типов хозяйств с учетом применяемых технологий выполнено с использованием баз данных ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Коэффициенты *MS* и *MCF* уточнены в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (соглашение 139-15-2023-004 от 01.03.2023 г.)

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за помощь в улучшении статьи.

**Для цитирования:** Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов / А. Ю. Брюханов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>

## Effect of Animal and Poultry Manure Processing Technologies on Greenhouse Gas Emissions

A. Yu. Briukhanov<sup>a</sup>, A. A. Romanovskaya<sup>b</sup>, E. V. Shalavina<sup>a</sup>✉,  
E. V. Vasilev<sup>a</sup>, V. Yu. Vertyankina<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute for Engineering and Environmental Problems  
in Agricultural Production – branch of FSAC VIM  
(St. Petersburg, Russian Federation)

<sup>b</sup> Institute of Global Climate and Ecology  
named after Academician Yu.A. Israel  
(Moscow, Russian Federation)

✉ shalavinaev@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** The agricultural sector is one of the most important sources of anthropogenic emissions. The correct accounting of greenhouse gas emissions in this sector depends on technologies used to process animal/poultry manure. To date, there is a lack of research to adjust the methane and nitrous oxide emissions from existing animal/poultry manure storages, because of the variety of technologies used. This is why the methodological approach developed to estimate the annual emissions of methane and nitrous oxide is so important.

**Aim of the Study.** The study is aimed at determining the impact of manure and litter processing technologies on annual emissions of methane and nitrous oxide.

**Materials and Methods.** To determine the emission of nitrous oxide and methane, there were calculated mass of animal/poultry manure and its total nitrogen and carbon content; there were analysed manure processing technologies such as long-term manure storing, passive and active composting, biofermentation, drying and granulation, incineration. There were performed calculations for two options: 1) according to the National Inventory of Anthropogenic Emissions, taking into account the share of manure processed with the use of each technology in 2022; 2) according to the actual data of technology distribution in 2022. The predictive estimate for the period up to 2030 was made for regions in the North-Western Federal District of the Russian Federation.

**Results.** The study analysed animal and poultry housing technologies at three types of enterprises: agricultural organizations, peasant (private) farms, and household farms.



There was calculated the animal/poultry manure mass generated at each type of enterprises and determined the share of manure processed with the use of each technology. Based on the data of the North-Western Federal District, there were calculated methane and nitrous oxide emissions in 2022 in CO<sub>2</sub>-eq.

*Discussion and Conclusions.* There was estimated the effect of manure collection and storage technologies on methane and nitrous oxide emissions. The obtained data on emissions exceeded by 35.6% (methane) and 14.2% (nitrous oxide) those calculated by the methods used in National Inventory indicating their refinement expediency. Categorization of agricultural enterprises makes calculations simpler for regional and national assessments. The refined data on manure collection and storing technologies and the emissions specific for these technologies will help to perform prediction calculations and determine options for technological upgrading to mitigate GHG emissions.

**Keywords:** greenhouse gas emission, methane, nitrous oxide, livestock farming, animal/poultry manure processing technologies, nitrogen, carbon

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Funding:** The quantity and quality of animal/poultry manure for three types of farms with due account for applied technologies were determined using the databases developed by IEEP – branch of FSAC VIM. *MS* and *MCF* coefficients were refined within the framework of the Crucial Innovative Project of State Significance “Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances” (Agreement 139-15-2023-004 dated 01.03.2023).

**Acknowledgements:** The authors express sincere thanks to anonymous reviewers for their time, effort, and valuable help in improving the manuscript.

**For citation:** Bryukhanov A.Yu., Romanovskaya A.A., Shalavina E.V., Vasilev E.V., Vertyankina V.Yu. Effect of Animal and Poultry Manure Processing Technologies on Greenhouse Gas Emissions. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>

**Введение.** Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) констатирует однозначно, что влияние человека на окружающую среду вызвало потепление атмосферы, океана и суши, наблюдаемое с середины XX в.<sup>1</sup> Российская Федерация является Стороной Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), Киотского протокола и Парижского соглашения. В соответствии со своими обязательствами по статьям 4 и 12 РКИК ООН Российская Федерация разрабатывает, периодически (в настоящее время, на основании решений Конференции Сторон РКИК ООН 18/СР.8 и 24/СР.19, ежегодно) обновляет, публикует и представляет Конференции Сторон РКИК ООН через ее секретариат – Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (далее – Кадастр).

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 марта 2006 г. № 278-р, принятым в Монреале 16 сентября 1987 г.<sup>2</sup>, была создана российская система оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями

<sup>1</sup> IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H. Lee and J. Romero (eds.)). Geneva, Switzerland : IPCC. 2023. P. 1–34. URL: <https://hdl.handle.net/10568/138472> (дата обращения: 25.05.2024).

<sup>2</sup> О создании российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, принятым в г. Монреале 16 сентября 1987 г. [Электронный ресурс] : Распоряжение Правительства РФ от 1 марта 2006 г. № 278-р. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_69640/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_69640/) (дата обращения: 18.03.2024).

парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой.

Одним из значимых источников антропогенных выбросов является аграрный сектор. 18 мая 2023 г. Российская Федерация представила в секретариат Рамочной конвенции ООН об изменении климата Национальный кадастр антропогенных выбросов за 1990–2021 гг. из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. Согласно данным Кадастра, в 2021 г. суммарные выбросы парниковых газов от аграрного сектора Российской Федерации составили 121 млн т  $\text{CO}_2$ -экв., что соответствует 51,6 % уровня 1990 г. (250 млн. т  $\text{CO}_2$ -экв.). В 2021 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы был выше (60,0 %) вклада  $\text{CH}_4$  – 39,2 %, вклад  $\text{CO}_2$  составляет около 0,8 %<sup>3</sup>.

Отчетность по аграрному сектору в Кадастре включает в себя выбросы метана от внутренней ферментации животных, выбросы метана и закиси азота от систем переработки навоза и помета, выбросы метана и закиси азота от сельскохозяйственных почв. Эмиссии углекислого газа от животноводства не включаются в оценки Кадастра, учитывая, что цикл углерода в системе выращивания кормовых трав, их переваривания животными и последующего разложения в виде навоза (помета) принимается за ноль и не рассматривается в Кадастре и в данной работе. Нетто-баланс углекислого газа для сельскохозяйственных почв включен в отчетность в рамках другого сектора Кадастра – сектора Землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. В нашей работе рассмотрены эмиссии таких парниковых газов, как метан и закись азота от различного сочетания технологий переработки навоза и помета для следующих категорий животных: крупный рогатый скот (КРС) (без коров), коровы, свиньи, птица. Эмиссии парниковых газов зависят также и от содержания в навозе и помете общего азота и углерода, которые различны в зависимости от систем содержания животных и систем сбора и хранения навоза и помета для трех рассмотренных типов предприятий: сельскохозяйственных организаций (СХО), крестьянско-фермерских хозяйств (КФХ) и хозяйств населения (ХН). Путем совершенствования технологий и модернизации производства возможно снижение общей эмиссии парниковых газов.

Учитывая большой объем обрабатываемой информации, планируется впоследствии разработать цифровой программный продукт, осуществляющий национальный мониторинг климатически активных веществ.

Целью исследования является определение для каждого региона влияния применяемых технологий переработки навоза и помета на эмиссии метана и закиси азота.

**Обзор литературы.** Исследователи из разных стран занимаются проблемой снижения эмиссии парниковых газов от систем переработки навоза и помета путем совершенствования технологий и модернизации производства, предусматривающих внедрение эффективных практик ведения сельского хозяйства [1; 2].

<sup>3</sup> Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/32581/> (дата обращения: 18.03.2024).



Компостирование является одним из основных методов переработки навоза и помета [3; 4]. При этом технология может быть реализована в различных режимах, влияющих на эмиссии парниковых газов.

В Китае в 2023 г. проведены исследования по эмиссиям парниковых газов в зависимости от длительности процесса компостирования для четырех видов сырья: свиной навоз, навоз КРС, овечий навоз, куриный помет. Результаты исследования показали, что вне зависимости от типа сырья 90 % парниковых газов образуется в ранние (0–15 дней) и поздние (36–49 дней) периоды компостирования. Доля  $\text{CO}_2$  составляла более 90 % в первые 35 дней, доля  $\text{N}_2\text{O}$  – 40...75 % в поздний период компостирования, а доля  $\text{CH}_4$  – менее 8,0 %. Выбросы  $\text{NH}_3$  из куриного помета и свиного навоза в 4,8 раза превышали выбросы из овечьего и коровьего навоза [5].

Корейскими учеными были проведены исследования по определению эмиссий от навоза КРС наиболее распространенной в Корее породы Hanwoo. В результате исследований установлено, что в период компостирования среднемесячные потоки выбросов  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  варьировались от  $1,449 \pm 0,783$  до  $86,930 \pm 19,092$  и от  $0,511 \pm 0,410$  до  $2,629 \pm 1,105$   $\text{мкг/м}^2$  соответственно. Рассчитанные потоки выбросов  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  от систем обращения с навозом в этом исследовании были выше значений, поданных странами Азии, Южной и Северной Америки в МГЭИК в 2006 г. [6], почти в 5,4 и 2,1 раза соответственно.

Эмиссиям парниковых газов в зависимости от уплотнения и влажности компостной смеси с навозом КРС в буртах на специализированных площадках посвящены исследования китайских ученых. Результаты показали, что интенсивность выбросов газов резко снизилась, когда содержание влаги увеличилось в навозе с высокой водоудерживающей способностью, в то время как обработки уплотнением не так сильно повлияли на интенсивность выбросов газов [7].

Также в Китае в 2020 г. проведен метаанализ выбросов парниковых газов и аммиака для четырех основных методов компостирования навоза КРС: статического, переворачивающего, валкового и силосного. В результате установлено, что компостирование с переворачиванием привело к большим потерям углерода и азота по сравнению с другими методами компостирования. Хотя компостирование в силосах значительно способствовало выбросу  $\text{NH}_3$ , оно сократило потери парниковых газов на 82,84 % по сравнению с компостированием методом переворачивания [8]. Таким образом, выбор технологического режима переработки навоза и помета методом компостирования позволяет снизить эмиссии метана и закиси азота до 15 % по сравнению с традиционными видами переработки.

Существуют также исследования, посвященные изучению влияния других технологий на эмиссии метана и закиси азота, а также выявлению наиболее оптимальной из них с климатической, экологической и экономической точек зрения. Например, проведенное в 2023 г. в Дании исследование по оценке эмиссии парниковых газов при длительном выдерживании четырех видов сырья: исходного навоза КРС, жидкой фракции навоза КРС, дигестата после анаэробного сбраживания жидкой фракции навоза КРС, жидкой фракции, полученной из биофильтра для десульфурации биогаза, обогащенного серой и аммонием. Результаты исследования показали,



что анаэробное сбраживание и сепарация значительно сократили выбросы  $\text{CH}_4$  во время хранения из-за уменьшения содержания разлагаемых органических веществ, доступных для метаногенов [9].

В 2021 г. египетские ученые провели исследования по извлечению питательных веществ из свежего жидкого навоза с помощью эрлифтного реактора для снижения выбросов парниковых газов в открытых анаэробных лагунах. Результаты показали возможное снижение эмиссий от анаэробных лагун на 51 % [10].

Германскими учеными в 2021 г. были проведены исследования по изучению четырех технологий переработки помета бройлеров: длительное выдерживание, компостирование, анаэробное сбраживание на биогазовой установке, производство биоугля. Исследования показали, что наибольшие выбросы были при технологии пассивного компостирования, наименьшие – при анаэробном сбраживании [11].

В Российской Федерации в 2008 г. выполнены оценки кумулятивных выбросов парниковых газов от животноводства, включая системы сбора и хранения навоза [12]. Результаты этих исследований впоследствии легли в основу национальной методологии оценки Кадастра. В 2023 г. в России проведены методические исследования по измерению эмиссии парниковых газов от систем хранения навоза КРС (жидкое и сухое хранение), свиного навоза и птичьего помета на территории РФ. Разработаны экспериментальные модельные установки для оценки эмиссии парниковых газов от таких систем<sup>4</sup>.

Помимо изменений самих технологий в мире, также проводятся исследования по сокращению эмиссии парниковых газов от систем переработки навоза в результате применения различных препаратов.

В США в 2021 г. проведены исследования по замеру эмиссий от навоза с пастбищ при выпасе бычков. Результаты показали, что применение инкапсулированного нитрата кальция и аммония не снижает выбросы парниковых газов из навоза [13]. В 2022 г. проведены исследования по снижению эмиссий метана и закиси азота от специализированных площадок переработки навоза откормочного поголовья КРС путем добавления в рацион питания специализированных добавок. Результаты исследования показали, что бромформ в дозе 8,6 г/кг корма снижает выбросы углекислого газа с площадок переработки навоза. Льняное масло в дозе 11 г/кг увеличило выбросы метана по сравнению с контролем, но ни одна концентрация льняного масла существенно не повлияла на средний поток углекислого газа или закиси азота из хранилищ навоза по сравнению с контролем [14].

В 2023 г. китайскими учеными проведены исследования по применению добавок в компостную смесь в процессе пассивного компостирования. В качестве исходного сырья использовался свиной навоз, в качестве добавки – бентонит. Исследования показали, что снижение выбросов  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  примерно на 17 % и 29 % соответственно было достигнуто в присутствии бентонита (10 % от массы сухого вещества навоза) при компостировании [15].

<sup>4</sup> Козлова Е. Н., Позднякова Е. А., Конькова А. С. Использование модельных установок для оценки эмиссии парниковых газов от систем хранения навоза // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества : материалы III Всерос. науч. конф. (15 – 17 ноября 2023 г., г. Москва). М., 2023. С. 136–140. EDN: MGIQHL



Канадские ученые в 2020 г. исследовали влияние подкисления навоза КРС на снижение эмиссии парниковых газов. В результате подкисления выбросы метана сократились на 38 %, закиси азота – на 50 %, аммиака – на 23 %. Однако авторы отмечают высокую стоимость подкислителя, что может быть доступно не всем фермерам [16].

В США (Калифорния) в 2021 г. проведены исследования по снижению эмиссии парниковых газов за счет добавления перед сепарированием в жидкий навоз флокулянтов: сульфата железа, хлорида железа, хлорида полиалюминия, Superfloc C-569 и хитозана. Результаты исследования показали, что выбросы метана при использовании любого вида флокулянтов достоверно снижались [17].

В 2023 г. в Эфиопии проведены исследования по снижению эмиссии парниковых газов в процессе компостирования навоза за счет добавления различных наполнителей – соломы и биоугля. Результаты исследования показали, что добавление биоугля сократило выбросы  $\text{CH}_4$  на 91 % и выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  на 56–57 % [18].

Канадскими учеными также проведены исследования по оценке эмиссии парниковых газов при добавлении биоугля во время компостирования навоза жвачных животных. Кроме того, оценивали эффект от добавления биоугля в рацион жвачных животных. Исследования показали, что эффективное снижение эмиссии парниковых газов от навоза происходит при смешивании самого навоза с биоуглем в процессе компостирования, а не при добавлении биоугля в рацион питания животных [19].

Таким образом, использование препаратов позволяет снизить эмиссии метана и закиси азота до 50 %, что подтверждает перспективность использования различных добавок для сокращения эмиссий, в частности биоугля (за счет его доступности и относительной дешевизны).

Проведенный анализ литературных источников показал, что проблема снижения эмиссии парниковых газов актуальна во всем мире, а на эмиссии значительно влияют технологии переработки навоза и режимы их работы. При этом в Российской Федерации отмечается недостаток исследований по уточнению выбросов метана и закиси азота от существующих систем хранения навоза и помета с учетом используемого разнообразия соответствующих технологий. В данной работе представлен методический подход к расчетной оценке годовой эмиссии метана и закиси азота от систем сбора и хранения навоза и помета в России, который учитывает разнообразие соответствующих технологий, характеристики навоза и помета, категории хозяйств и применяемые в них технологии содержания животных и птицы.

**Материалы и методы.** Расчет выбросов  $\text{CH}_4$  (Гг/год) в результате уборки, хранения и использования навоза/помета осуществлен в соответствии с Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации<sup>5</sup> по формуле:

<sup>5</sup> Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс] : Распоряжение Минприроды России от 16 апреля 2015 № 15-р. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_256422/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256422/) (дата обращения: 18.03.2024).

$$CH_4 = \sum_{(T)} \frac{EF_{(T)} \cdot N_{(T)}}{10^6}, \quad (1)$$

где  $EF_{(T)}$  – коэффициент выбросов метана для установленного поголовья скота/птицы, кг  $CH_4$  на 1 голову в год;  $N_{(T)}$  – количество голов скота и птицы вида/категории/подкатегории  $T$  в регионе.

Коэффициент выбросов  $CH_4$  в результате сбора и хранения навоза и помета определяется по формуле:

$$EF_{(T)} = VS_{(T)} \cdot 365 \cdot B_{0(T)} \cdot 0,67 \cdot \sum_{S,k} \frac{MCF_{(S,k)}}{100} \cdot MS_{(T,S,k)}, \quad (2)$$

где  $VS_{(T)}$  – суточное выделение летучего вещества для заданной категории  $T$  скота, кг сухого вещества на 1 голову;  $B_{0(T)}$  – максимальная метанопродуцирующая способность для навоза скота (помета птицы) категории  $T$ ,  $m^3 CH_4$  на кг  $VS$ ;  $0,67$  – плотность метана,  $kg/m^3$ ;  $MCF_{(S,k)}$  – коэффициенты преобразования метана для каждой системы  $S$  сбора и хранения навоза и помета по климатическому региону  $k$ , %;  $MS_{(T,S,k)}$  – доля навоза (помета птицы) от  $T$  скота, которая обрабатывается с использованием определенной системы  $S$  сбора и хранения навоза и помета в климатическом регионе  $k$ , не имеет размерности.

Для расчета прямых выбросов  $N_2O_{D(mm)}$  (кг  $N_2O$ /год) от систем сбора и хранения навоза и помета в регионе используется формула:

$$N_2O_{D(mm)} = (\sum_S (\sum_T (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)})) \cdot EF_{3(S)}) \cdot \frac{44}{28}, \quad (3)$$

где  $Nex_{(T)}$  – среднегодовое выделение азота на одну голову скота вида/категории/подкатегории  $T$  в регионе, кг  $N$  на 1 голову в год;  $EF_{3(S)}$  – коэффициент выбросов для прямых выбросов  $N_2O_{D(mm)}$  от систем сбора и хранения навоза и помета  $S$  в регионе, кг  $N_2O-N$  на кг  $N$  в системе  $S$ ;  $S$  – система сбора и хранения навоза и помета;  $44/28$  – коэффициент пересчета азота в оксид азота.

Для расчета косвенных выбросов  $N_2O_{G(mm)}$  (кг /год), связанных с улетучиванием азота в результате сбора и хранения навоза и помета, используется формула:

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{\text{улет.-MMS}} \cdot EF_4) \cdot \frac{44}{28}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{улет.-MMS}}$  – количество азота, которое теряется из навоза через улетучивание  $NH_3$  и  $NO_x$ , кг/год;  $EF_4$  – коэффициент выбросов  $N_2O$  в результате осаждения азота из атмосферы на почву и водные поверхности, кг  $N_2O-N$  на кг улетучившихся  $NH_3-N + NO_x-N$ .

Потери азота через улетучивание определяются по формуле:

$$N_{\text{улет.-MMS}} = \sum_S \left[ \sum_T \left[ (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)}) \cdot \left( \frac{F_{\text{раcTазM}_6}}{100} \right)_{(T,S)} \right] \right], \quad (5)$$

где  $F_{\text{раcTазM}_6}$  – процентная доля азота в обработанных навозе скота и помете птицы категории/подкатегории  $T$ , которая улетучивается в виде  $NH_3$  и  $NO_x$  в данной системе сбора и хранения навоза и помета  $S$ , %.



Технологии сбора, хранения и переработки навоза и помета определяют наиболее существенные параметры уравнений (1)–(5):  $MCF_{(s,k)}$  и  $MS_{(t,s)}$ .

В Кадастре данные коэффициенты определены укрупненно, без детальной классификации технологий содержания животных и птицы в каждом типе рассматриваемых предприятий (СХО, КФХ, ХН), характеристик самого навоза и помета, а также систем сбора и хранения навоза и помета (далее – технологий переработки).

Чтобы понять, как расчет эмиссии зависит от технологий переработки через применяемые коэффициенты  $MCF_{(s,k)}$  и  $MS_{(t,s)}$ , произведен расчет годовых эмиссий метана и закиси азота для двух вариантов: 1) по данным Кадастра с учетом доли навоза, перерабатываемого каждой технологией, и фактической массы навоза, рассчитанной на основании статистических данных за 2022 г.; 2) по фактическим данным распределения технологий с последующим определением доли перерабатываемого навоза в соответствии с каждой технологией и фактической массой навоза, рассчитанной на основании статистических данных за 2022 г. Кроме того, выполнены прогнозные оценки эмиссий по данным на период до 2030 г. (на основании программ развития сельскохозяйственной отрасли) с учетом распределения технологий и доли перерабатываемого навоза в соответствии с каждой технологией и прогнозной массой навоза<sup>6</sup>.

Реализация данного подхода требует сбора детальной информации о технологиях содержания животных/птицы и технологиях переработки навоза/помета, которую необходимо получать непосредственно у сельхозтоваропроизводителей.

<sup>6</sup> Об утверждении государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Архангельской области [Электронный ресурс] : Постановление правительства Архангельской области от 9 октября 2012 г. № 436-пп. URL: <https://office.dvinaland.ru/docs/pub/2c6f8bf08a5326550ffe98e6e0bb76c7/default/?&> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Калининградской области «Сельское хозяйство и рыболовство» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Калининградской области от 21 декабря 2021 г. № 841. URL: <https://clck.ru/3ELZd6> (дата обращения: 23.04.2024); О государственной программе «Развитие агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Вологодской области» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Вологодской области от 26 августа 2019 г. № 791. URL: <https://clck.ru/3ELZNP> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Республики Карелия «Развитие агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Республики Карелия от 20 января 2015 г. № 7-П. URL: <https://clck.ru/3EGM93> (дата обращения: 23.04.2024); Концепция развития промышленного и рыбохозяйственного комплексов Республики Коми на 2023–2028 годы [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3EGMbc> (дата обращения: 23.04.2024); О государственной программе Ленинградской области «Развитие сельского хозяйства Ленинградской области» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Ленинградской области от 29 декабря 2012 г. № 463. URL: <https://clck.ru/3EGMN9> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Мурманской области «Рыбное и сельское хозяйство» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Мурманской области от 11 ноября 2020 г. № 787-ПП. URL: <https://clck.ru/3EGMSK> (дата обращения: 12.05.2024); О государственной программе Новгородской области «Развитие сельского хозяйства в Новгородской области на 2019–2024 годы» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Новгородской области от 18 июня 2019 г. № 222 (ред. от 29 января 2021 г.). URL: <https://clck.ru/3EGMXz> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Псковской области «Комплексное развитие сельских территорий» [Электронный ресурс] : Постановление администрации Псковской области от 19 декабря 2019 г. № 445. URL: [https://cx.pskov.ru/sites/default/files/gp\\_po\\_krst\\_mart\\_2021.doc](https://cx.pskov.ru/sites/default/files/gp_po_krst_mart_2021.doc) (дата обращения: 18.03.2024); Об утверждении государственной программы Ненецкого автономного округа «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Ненецком автономном округе» [Электронный ресурс] : Постановление администрации Ненецкого автономного округа от 22 октября 2014 г. № 405-п. URL: <https://clck.ru/3EGMbH> (дата обращения: 18.03.2024).

Учитывая заделы ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ по научным исследованиям в Северо-западном федеральном округе (СЗФО) и накопленную большую базу данных, дальнейший расчет выполнен на примере СЗФО.

При расчете эмиссии закиси азота и метана использованы следующие значения для коэффициента  $MS_{(T,S)}$ :

- 1) для варианта 1 – на основе данных Кадастра (таблицы 5.11 и 5.12)<sup>7</sup>;
- 2) для варианта 2 (базового) – на основе данных изучения животноводческих и птицеводческих комплексов в 2022 г.;
- 3) для прогнозных оценок – на основе данных, полученных с учетом региональных программ развития до 2030 г. для каждого субъекта СЗФО.

При расчете эмиссии метана использованы следующие значения коэффициента  $MCF_{(S,k)}$ :

- 1) для варианта 1 использован коэффициент  $MCF$  из таблицы 10.17 методических рекомендаций МГЭИК 2006 г.<sup>8</sup>;
- 2) для варианта 2 (базового) и прогнозных оценок рассчитан средневзвешенный коэффициент  $MCF_{(S,k)}$  на основе значений коэффициента  $MS_{(T,S)}$ , которые были получены в результате проведенного анализа (см. выше).

Для определения эмиссии закиси азота и метана рассчитана масса получаемого навоза и помета (кг/год), содержание в нем общего азота и углерода (%), проанализированы технологии переработки навоза и помета для трех типов предприятий с учетом применяемых технологий содержания животных. По поголовью данные взяты с сайта Федеральной службы государственной статистики<sup>9</sup>. Расчет массы навоза/помета и содержание в нем общего азота и углерода проведен в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17<sup>\*10</sup> для трех категорий животных (КРС, свиньи, птица) и для трех типов предприятий (СХО, КФХ, ХН).

К 2030 г. в молочном животноводстве в связи с общей тенденцией перехода на беспривязное содержание животных и получением полужидкого и жидкого навоза<sup>11</sup> средневзвешенные значения коэффициента преобразования метана увеличатся от 2 до 6 %. В свиноводстве и птицеводстве, учитывая требования экологического законодательства и соответствующее увеличение доли технологии «Длительное выдерживание твердого навоза/помета», ожидается уменьшение средневзвешенного значения коэффициента преобразования метана.

Масса навоза/помета определялась как сумма экскрементов, подстилочного материала и технологической воды. Масса общего азота и углерода в навозе/помете определялась как сумма азота и углерода в экскрементах и в подстилочном материале.

<sup>7</sup> Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг.

<sup>8</sup> Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов : в 5 т. МГЭИК, 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (дата обращения: 18.03.2024).

<sup>9</sup> Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 18.03.2024).

<sup>10</sup> РД-АПК 1.10.15.02-17\*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3F4pxf> (дата обращения: 18.03.2024).

<sup>11</sup> Технологическое проектирование молочных ферм КРС / В. Е. Хазанов [и др.] : моногр. СПб, 2023. 117 с. EDN: YHIZPT

В расчете использовались нормативные значения для СХО и ХН по массе экскрементов<sup>12</sup>, технологической воды и подстилочного материала<sup>13</sup>; влажности экскрементов и подстилочного материала; содержанию в экскрементах общего азота и зольности; содержанию в подстилочном материале общего азота и углерода. Расчет содержания углерода в экскрементах произведен через зольность<sup>14</sup>.

В расчеты заложено, что свиньи в СХО содержатся на частично-целевых полах без применения подстилочного материала<sup>15</sup>; свиньи в ХН содержатся на монолитных полах на подстилке; птица в СХО выпаса не подлежит<sup>16</sup>.

Учитывая, что для обеспечения бесперебойной работы системы удаления свиного навоза в сельскохозяйственных организациях минимальная влажность навоза должна быть 92 %, в расчетах учтена минимальная масса технологической воды, равная 2 кг на 1 голову в сутки.

Были проанализированы технологии переработки навоза и помета в СЗФО. Расчет сделан для категорий животных, содержащихся во всех трех типах хозяйств: КРС, свиньи, птица.

Расчетную массу навоза/помета в СЗФО перераспределили между технологиями переработки, применяемыми в регионах на основании значений, полученных в результате расчетов коэффициентов  $MS_{(T,S)}$ . Для возможности сравнения этих данных с материалами, отраженными в Кадастре, все технологии разделили по типу перерабатываемого навоза/помета: твердый и жидкий. Рассмотренные технологии: длительное выдерживание твердого или жидкого навоза/помета, пассивное компостирование, активное компостирование, биоферментация, сушка и грануляция, сжигание.

Полученные данные обработаны методами математической статистики в программе Excel.

**Результаты исследования.** На первом этапе, после анализа результатов расчетов, установлено, что в СЗФО на всех типах хозяйств в 2022 г. образовалось: 12,8 млн т навоза КРС, в которых содержится 42,8 тыс. т азота и 719,8 тыс. т углерода; 6,9 млн т свиного навоза, в которых содержится 19,7 тыс. т азота и 32,5 тыс. т углерода; 2,1 млн т куриного помета, в которых содержится 32,5 тыс. т азота и 457 тыс. т углерода.

<sup>12</sup> РД-АПК 1.10.15.02-17\*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета.

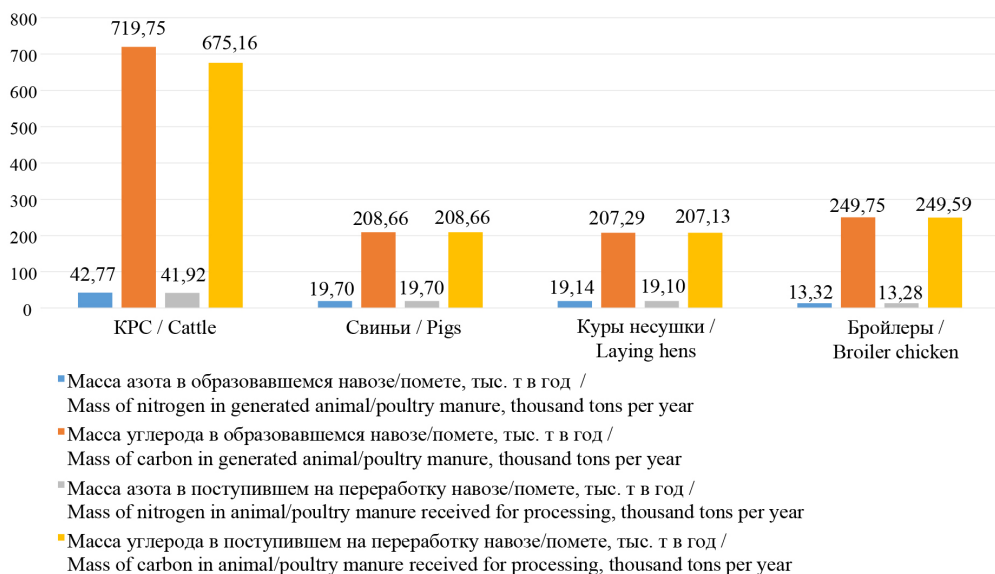
<sup>13</sup> РД-АПК 1.10.01.01-18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3EGPtm> (дата обращения: 18.03.2024).

<sup>14</sup> ГОСТ 27980-88. Удобрения органические. Методы определения органического вещества. М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11598/> (дата обращения: 18.03.2024).

<sup>15</sup> Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 41-2023 «Интенсивное разведение свиней». М. : Бюро НДТ, Росстандарт, 2023. 340 с. URL: <https://clck.ru/3EGRPc> (дата обращения: 18.03.2024).

<sup>16</sup> Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 42-2023 «Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы». М. : Бюро НДТ, Росстандарт, 2023. 188 с. URL: <https://clck.ru/3EGa5F> (дата обращения: 18.03.2024).

В соответствии с Кадастром определен процент выпаса сельскохозяйственных животных и птицы. Была скорректирована масса навоза и помета, а также масса азота и углерода в нем, поступающая на переработку (рис. 1).



Р и с. 1. Масса азота и углерода в навозе и помете, полученном в СЗФО в 2022 г.

F i g. 1. Mass of nitrogen and carbon in animal/poultry manure generated in North-Western Federal District in 2022

Источник: рисунки 1, 2 получены авторами статьи расчетным путем на основании статистических данных.

Source: figures 1, 2 were made by the authors of the article by calculation on the basis of statistical data.

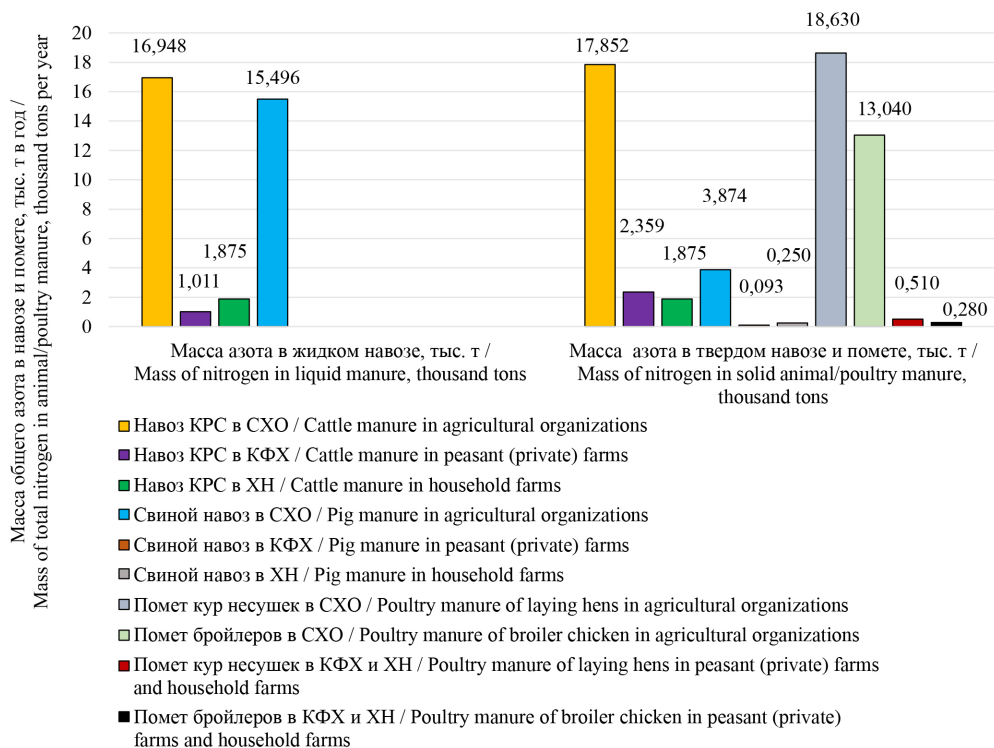
При проведении обследования предприятий КРС выявлено, что всего в СХО за год поступает на переработку 5,19 млн т твердого навоза и 5,45 млн т жидкого навоза; в КФХ и ХН суммарно – 1,14 млн т твердого навоза и 0,77 млн т жидкого навоза.

Анализ свиноводческих предприятий показал, что в СХО ежегодно поступает на переработку 1,36 млн т твердого навоза и 5,43 млн т жидкого навоза; в КФХ и ХН – 0,08 млн т твердого навоза.

Распределение массы азота в навозе и помете по типам хозяйств в СЗФО представлено на рисунке 2.

По нашим расчетам в СЗФО во всех типах хозяйств и от всех групп животных поступает на переработку 94 тыс. т азота: 35,33 тыс. т в жидком навозе и 58,67 тыс. т в твердом навозе и помете.

На рисунке 3 представлен результат расчета коэффициента  $MS_{(T,S)}$  для СЗФО в зависимости от типов предприятий и влажности получаемого на предприятиях навоза/помета [20]. Цифры соответствуют распределению технологий переработки навоза/помета (составляющая коэффициента  $MS_{(T,S)}$  для варианта 2).



Р и с. 2. Масса общего азота в поступающем на переработку навозе и помете в различных типах хозяйств

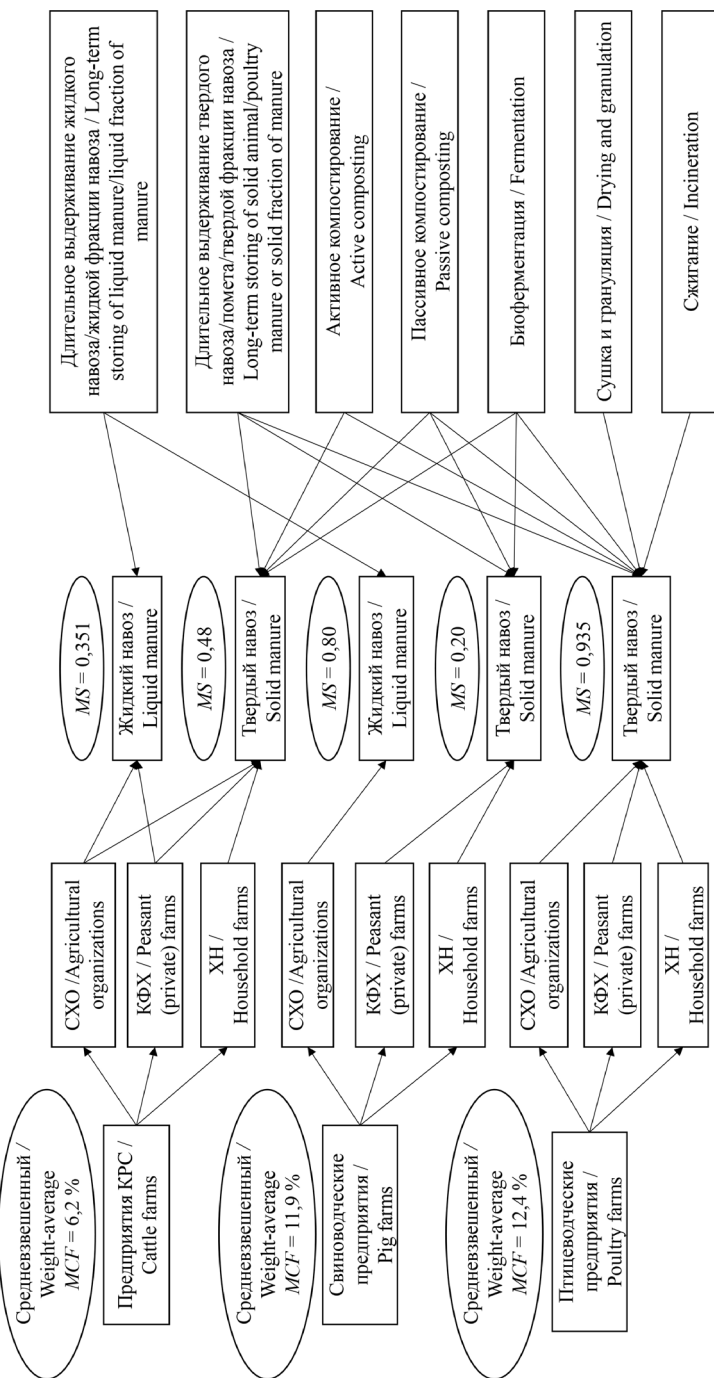
Fig. 2. Mass of total nitrogen in animal/poultry manure delivered for processing in various farm types

Из рисунка 3 видно, что технология переработки навоза и помета выбирается в зависимости от влажности на каждом типе предприятий. Каждой технологии соответствует свой коэффициент эмиссии, который влияет на получаемые значения выбросов парниковых газов.

На рисунках 4, 5 представлен пример результата расчета эмиссии метана и закиси азота для СЗФО на основе полученных коэффициентов распределения технологий переработки и средневзвешенных значений коэффициентов преобразования метана для двух вариантов расчета для 2022 г. (по данным Кадастра и базовому распределению технологий) и прогнозные оценки на 2030 г.

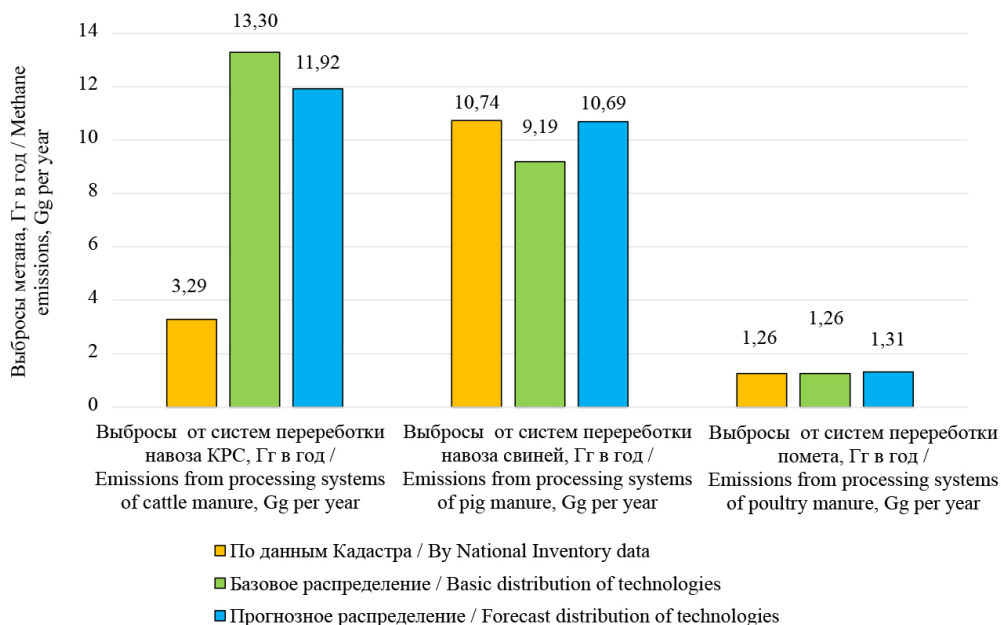
В результате расчетов для СЗФО установлено, что эмиссии метана и закиси азота в пересчете на  $\text{CO}_2$  эквивалент составили: по данным Кадастра 382,3 и 193,4 тыс. т (Гг) в год соответственно; по базовому распределению технологий 594 и 225,4 тыс. т (Гг) в год соответственно; по прогнозному распределению технологий 598,1 и 249,6 тыс. т (Гг) в год соответственно. Полученные значения говорят о том, что расчетные эмиссии при уточненном распределении технологий переработки навоза и помета увеличиваются на 35,6 % и 14,2 % для метана и закиси азота соответственно, по сравнению с укрупненным распределением, применяемым в Кадастре.



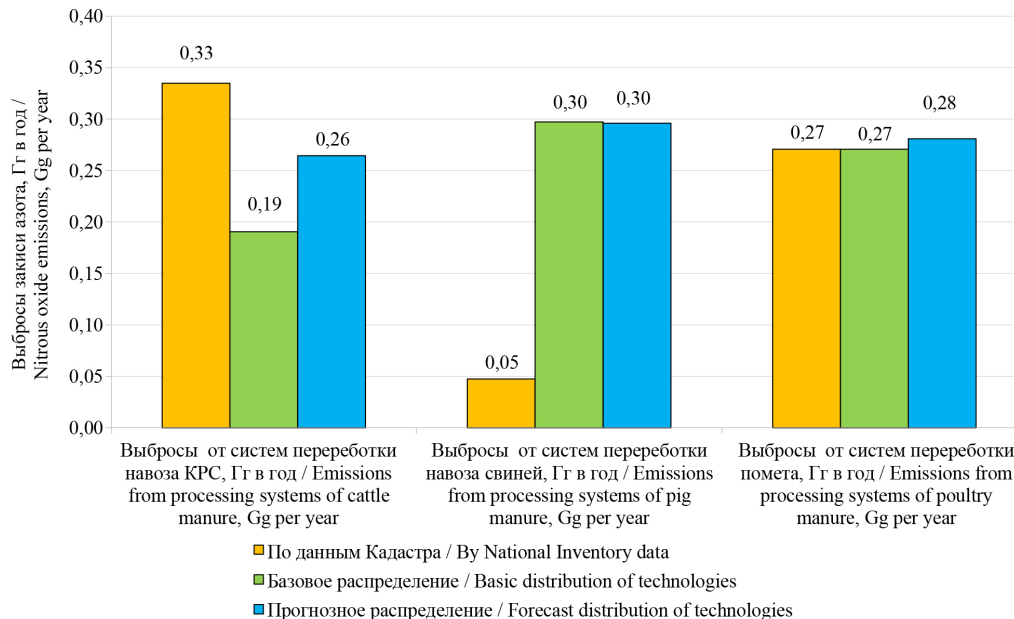


Р и с. 3. Результат расчета коэффициента  $MS_{(t,s)}$  для варианта 2 для СЗФО  
 Fig. 3. Calculation result of  $MS_{(t,s)}$  coefficient for Version 2 for North-Western Federal District

Источники: здесь и далее рисунки получены авторами статьи расчетным путем на основании натурного обследования предприятий, статистических и литературных данных.  
 Source: hereinafter in this article the figures are made by the authors of the article by calculation on the basis of field survey of enterprises, statistical and literary data.



Р и с. 4. Выбросы метана в СЗФО  
F i g. 4. Methane emissions in North-Western Federal District



Р и с. 5. Выбросы закиси азота в СЗФО  
F i g. 5. Nitrous oxide emissions in North-Western Federal District

Основными факторами, способными оказывать влияние на отклонения полученных оценок эмиссий парниковых газов для СЗФО от значений, отраженных в Кадастре, являются:

1) отличие в типах получаемого навоза, отраженных в Кадастре, и получаемых на животноводческих предприятиях в СЗФО. Наибольшее отличие наблюдается у молочного животноводства. В Кадастре указано, что для коров применяются только системы сухого хранения, которые подразумевают получение на предприятиях твердого навоза. В СЗФО, как и многих других регионах, более 50 % ферм используют беспривязный способ содержания животных. На таких фермах образуется преимущественно полужидкий навоз;

2) отличие в технологиях переработки навоза, отраженных в Кадастре, и применяемых в СЗФО. Наибольшее отличие наблюдается у предприятий крупного рогатого скота. В Кадастре указано, что для коров применяется система пастбищного содержания – 16,9 %, а для КРС (без коров) – 26 %. Обследование предприятий КРС в СЗФО показало, что животные содержатся в основном на круглогодичном стойловом содержании. Следовательно, увеличивается масса перерабатываемого навоза.

Учитывая значительные отклонения полученных оценок эмиссий парниковых газов от значений, отраженных в Кадастре, целесообразно оценить другие регионы Российской Федерации по разработанной нами методике. Для этого необходимо организовать работу по сбору исходных данных по субъектам РФ.

**Обсуждение и заключение.** За счет того, что в большинстве случаев в КФХ и ХН животные содержатся на глубокой подстилке, весь твердый навоз из помещений содержания животных удаляют механизированными средствами или вручную. В сельскохозяйственных организациях во всех регионах процент жидкого навоза больше 80 %, удаление его осуществляется соответствующими механизмами, оснащенными насосами различных типов.

В результате обследований животноводческих и птицеводческих комплексов установлено, что список применяемых технологий больше, чем указанный в Кадастре. С учетом того, что каждой технологии переработки соответствует свой коэффициент эмиссии, расчетные значения значительно отличаются от указанных в Кадастре.

В частности, по комплексам КРС в Кадастре указано, что весь навоз от коров (за исключением навоза, оставленного на пастбищах) является твердым ( $MS_{(T,S)} = 0,831$ ). Соответственно, для расчета применяются коэффициенты, характеризующие технологии работы с твердым навозом ( $MCF_{(S,k)} = 4\%$ ,  $EF_3 = 0,01$  кг  $N_2O-N$ /кг выделенного  $N$ ). Однако обследования комплексов КРС показали, что с учетом интенсификации отрасли молочного животноводства образуются также значительные объемы стоков с доильных залов, что приводит к образованию жидкого навоза. Следовательно, при расчете для соответствующей доли навоза КРС необходимо использовать коэффициент, характеризующий жидкий навоз ( $MCF_{(S,k)} = 17\%$ ,  $EF_3 = 0,005$  кг  $N_2O-N$ /кг выделенного  $N$ ).

В связи с продолжающейся интенсификацией отрасли свиноводства и переходом на бесподстилочное содержание свиней, доля технологии длительного выдерживания навоза будет увеличиваться при снижении доли технологии пассивного компостирования.



В свиноводстве и птицеводстве с учетом изменения экологического законодательства технология хранения навалом будет замещаться технологиями длительного выдерживания или пассивного компостирования на специализированных площадках.

Исследование показало, что с учетом результатов изучения используемых систем содержания животных и птицы, а также применяемых технологий сбора и хранения навоза, эмиссии метана и закиси азота превышают на 35,6 % и 14,2 % соответственно значения из Кадастра.

Выполненные прогнозные оценки эмиссий парниковых газов от систем сбора и хранения навоза показали, что к 2030 г. в СЗФО ожидается рост эмиссий метана от систем переработки навоза свиней на 16,3 % и эмиссии закиси азота от систем переработки навоза КРС (коровы и КРС без коров) на 38,6 %, по сравнению с уровнем 2022 г. При этом возможно сокращение выбросов метана от навоза КРС и навоза коров на 16,3 % и 5,3 % соответственно. В целом ожидается, что суммарные эмиссии метана вырастут на 0,7 %, а эмиссии закиси азота – на 10,8 %. Следовательно, необходимо планирование мер по сокращению выбросов от животноводства на период до 2030 г. для выполнения целей утвержденной Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выброса парниковых газов.

Для разработки таких мер необходима дезагрегированная оценка выбросов парниковых газов, позволяющая учитывать все разнообразие применяемых технологий переработки навоза и помета в части распределения (составляющая коэффициента  $MS_{(T,S)}$ ) и соотнесение соответствующих коэффициентов эмиссии ( $MCF_{(S,k)}$  и  $EF_3$ ) с каждой технологией. Это позволит повысить точность и качество данных Кадастра и, соответственно, уточнить результаты расчетов выбросов парниковых газов от животноводства.

Учитывая существенные отклонения, целесообразно рассмотреть вопрос уточнения методики определения эмиссии метана и закиси азота в части учета технологических особенностей животноводческих и птицеводческих предприятий. Категорирование предприятий на СХО, КФХ и ХН позволяет их типизировать, что упрощает расчет при оценках на уровне регионов и страны. При этом данные об используемых технологиях сбора и хранения навоза и аккумуляции информации о присущих этим системам эмиссиях позволят провести прогнозные расчеты и определить направления технико-технологической модернизации для снижения выбросов парниковых газов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ динамики и структуры эмиссии парниковых газов в сельском хозяйстве России / Ю. Н. Романцева [и др.] // *Аграрная наука*. 2024. № 2. С. 139–145. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
2. Ахметшина Л. Г. Возможности российского сельского хозяйства в снижении выбросов парниковых газов и адаптации к климатическим изменениям // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2022. № 4. Ч. 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.17513/vaael.2129>
3. Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А. Анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. № 3 (116). С. 110–123. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>

4. Ветеринарно-санитарная оценка современных биотехнологических способов переработки навоза / В. Г. Тюрин [и др.] // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2022. № 2 (42). С. 230–238. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202202012>
5. Relating Bacterial Dynamics and Functions to Greenhouse Gas and Odor Emissions during Facultative Heap Composting of Four Kinds of Livestock Manure / L. Li [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 345. Article no. 118589. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>
6. Estimation of Greenhouse Gas Emission from Hanwoo (Korean Native Cattle) Manure Management Systems / S. Won [et al.] // Atmosphere. 2020. Vol. 11, Issue 8. Article no. 845. <https://doi.org/10.3390/atmos11080845>
7. Compaction Effects on Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Solid Dairy Manure / F. Chang [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 332. Article no. 117399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
8. Ba S., Qu Q., Zhang K., Groot J.C.J. Meta-Analysis of Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Dairy Manure Composting // Biosystems Engineering. 2020. Vol. 193. P. 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.015>
9. Greenhouse Gas Balances and Yield-Scaled Emissions for Storage and Field Application of Organic Fertilizers Derived from Cattle Manure / X. Meng [et al.] // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2023. Vol. 345. Article no. 108327. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108327>
10. Nutrients Recovery from Fresh Liquid Manure Through an Airlift Reactor to Mitigate the Greenhouse Gas Emissions of Open Anaerobic Lagoons / M. Sobhi [et al.] // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 294. Article no. 112956. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112956>
11. Greenhouse Gas Emissions from Broiler Manure Treatment Options Are Lowest in Well-Managed Biogas Production / U. Kreidenweis [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 280. Part 2. Article no. 124969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124969>
12. Романовская А. А. Оценка антропогенной эмиссии метана в животноводстве России // Сельскохозяйственная биология. 2008. № 6. С. 59–65. URL: <https://www.agrobiology.ru/6-2008romanovskaya.html> (дата обращения: 11.05.2024).
13. Effects of Encapsulated Calcium-Ammonium Nitrate on Greenhouse Gas Emissions from Manure of Beef Steers Grazing a Mature Mixed-Winter Forage / D. D. Henry [et al.] // Journal of Animal Science. 2021. Vol. 99. P. 146–147. <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.269>
14. Effect of Bromoform and Linseed Oil on Greenhouse Gas Emissions from Stored Beef Manure / A. O. Balsero [et al.] // ASABE Annual International Meeting. 2022. Article no. 2200416. <https://doi.org/10.13031/aim.202200416>
15. Impact of Bentonite on Greenhouse Gas Emissions during Pig Manure Composting and Its Subsequent Application / J.-P. Wu [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 344. Article no. 118453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118453>
16. Acidification of Residual Manure in Liquid Dairy Manure Storages and Its Effect on Greenhouse Gas Emissions / V. Sokolov [et al.] // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2020. Vol. 4. Article no. 568648. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.568648>
17. Ellison R. J., Horwath W. R. Reducing Greenhouse Gas Emissions and Stabilizing Nutrients from Dairy Manure Using Chemical Coagulation // Journal of Environmental Quality. 2021. Vol. 50, Issue 2. P. 375–383. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20195>
18. Biochar Addition Reduces Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions during Composting of Human Excreta and Cattle Manure / D. Castro-Herrera [et al.] // Journal of Environmental Quality. 2023. Vol. 52, Issue 4. P. 814–828. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20482>
19. Effects of Feeding a Pine-Based Biochar to Beef Cattle on Subsequent Manure Nutrients, Organic Matter Composition and Greenhouse Gas Emissions / C. M. Romero [et al.] // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 812. Article no. 152267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152267>
20. Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 3. С. 507–517. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>

## REFERENCES

1. Romantseva Yu.N., Bodur A.M., Maslakova V.V., Kagirova M.V. Analysis of the Dynamics and Structure of Greenhouse Gas Emissions in Russian Agriculture. *Agrarian Science*. 2024;(2):139–145. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
2. Akhmetshina L.G. Opportunities for Russian Agriculture to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Adapt to Climatic Changes. *Vestnik Altaiskoi Akademii Ekonomiki i Prava*. 2022;4(1):5–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17513/vael.2129>
3. Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of Technologies for Processing Animal Waste in Different Natural and Climatic Conditions of Russia. *AgroEcoEngineering*. 2023;3(116):110–124. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>
4. Tyurin V.G., Mysova G.A., Potemkina N.N., Sakharov A.Yu., Kochish O.I., Biryukov K.N. Veterinary and Sanitary Assessment of Modern Biotechnological Methods of Manure Processing. *Problemy Veterinarnoi Sanitarii, Gigienny i Ecologii*. 2022;2(42):230–238. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202202012>
5. Li L., Liu Y., Kong Y., Zhang J., Shen Y., Li G., et al. Relating Bacterial Dynamics and Functions to Greenhouse gas and Odor Emissions during Facultative Heap Composting of four Kinds of Live-stock Manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;345:118589. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>
6. Won S., Yoon Y., Ali Hamid M.M., Reza A., Shim S., Kim S., et al. Estimation of Greenhouse Gas Emission from Hanwoo (Korean Native Cattle) Manure Management Systems. *Atmosphere*. 2020;11(8):845. <https://doi.org/10.3390/atmos11080845>
7. Chang F., Fabian-Wheeler E., Richard T.L., Hile M. Compaction Effects on Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Solid Dairy Manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;332:117399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
8. Ba S., Qu Q., Zhang K., Groot J.C.J. Meta-Analysis of Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Dairy Manure Composting. *Biosystems Engineering*. 2020;193:126–137. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.015>
9. Meng X., Sørensen P., Møller H.B., Petersen S.O. Greenhouse Gas Balances and Yield-Scaled Emissions for Storage and Field Application of Organic Fertilizers Derived from Cattle Manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023;345:108327. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108327>
10. Sobhi M., Gaballah M.S., Han T., Cui X., Li B., Sun H., et al. Nutrients Recovery from Fresh Liquid Manure through an Airlift Reactor to Mitigate the Greenhouse Gas Emissions of Open Anaerobic Lagoons. *Journal of Environmental Management*. 2021;294:112956. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112956>
11. Kreidenweis U., Breier J., Herrmann C., Libra J., Prochnow A. Greenhouse Gas Emissions from Broiler Manure Treatment Options Are Lowest in Well-Managed Biogas Production. *Journal of Cleaner Production*. 2021;280(2):124969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124969>
12. Romanovskaya A.A. Estimation of Volumes of Anthropogenic Emissions of Methane in Russian Animal Husbandry. *Agricultural Biology*. 2008;6:59–65. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.agrobiolgy.ru/6-2008romanovskaya.html> (accessed 11.05.2024).
13. Henry D.D., Osorio A.M., Mejia-Turcios S.E., Vargas D.A., Slaughter L.C., Kohmann M., et al. Effects of Encapsulated Calcium-Ammonium Nitrate on Greenhouse Gas Emissions from Manure of Beef Steers Grazing a Mature Mixed-Winter Forage. *Journal of Animal Science*. 2021;99:146–147. <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.269>
14. Balsero A.O., Zelt M., Schmidt A.M., Fudolig M., Miller D.N. Effect of Bromoform and Linseed Oil on Greenhouse Gas Emissions from Stored Beef Manure. *ASABE Annual International Meeting*. 2022;2200416. <https://doi.org/10.13031/aim.202200416>
15. Wu J.-P., Li M.-L., Wang Y., Lin S., Hu R.-G., Xiang R.-B. Impact of Bentonite on Greenhouse Gas Emissions during Pig Manure Composting and Its Subsequent Application. *Journal of Environmental Management*. 2023;344:118453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118453>

16. Sokolov V., VanderZaag A., Habtewold J., Dunfield K., Tambong J.T., Wagner-Riddle C., et al. Acidification of Residual Manure in Liquid Dairy Manure Storages and Its Effect on Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020;4:568648. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.568648>
17. Ellison R.J., Horwath W.R. Reducing Greenhouse Gas Emissions and Stabilizing Nutrients from Dairy Manure Using Chemical Coagulation. *Journal of Environmental Quality*. 2021;50(2):375–383. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20195>
18. Castro-Herrera D., Prost K., Kim D.-G., Yimer F., Tadesse M., Gebrehiwot M., et al. Biochar Addition Reduces Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions during Composting of Human Excreta and Cattle Manure. *Journal of Environmental Quality*. 2023;52(4):814–828. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20482>
19. Romero C.M., Redman A.-A.P.H., Owens J., Terry S.A., Ribeiro G.O., Gorzelak M.A., et al. Effects of Feeding a Pine-Based Biochar to Beef Cattle on Subsequent Manure Nutrients, Organic Matter Composition and Greenhouse Gas Emissions. *Science of the Total Environment*. 2022;812:152267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152267>
20. Briukhanov A. Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V. Forecast Distribution of Cattle Manure Processing Technologies in the Russian Federation. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):507–517. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>

*Об авторах:*

**Брюханов Александр Юрьевич**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, Researcher ID: B-7550-2018, Scopus ID: 57190026573, SPIN-код: 8932-5083, sznii@ya.ru

**Романовская Анна Анатольевна**, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля (107258, Российская Федерация, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8943-170X>, Researcher ID: J-8166-2013, Scopus ID: 6603121727, SPIN-код: 3370-6390, an\_roman@igce.ru

**Шалавина Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, Researcher ID: C-1980-2018, Scopus ID: 57190026700, SPIN-код: 4075-6888, shalavinaev@mail.ru

**Васильев Эдуард Вадимович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, Scopus ID: 57190024035, SPIN-код: 9810-9439, sznii6@yandex.ru

**Вертянкина Виктория Юрьевна**, научный сотрудник отдела мониторинга потоков парниковых газов в природных и антропогенно-нарушенных экосистемах института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля (107258, Российская Федерация, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3934-7872>, Researcher ID: Y-8301-2018, SPIN-код: 6487-8721, victoria\_vert@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

А. Ю. Брюханов – концептуализация, руководство исследованием.

А. А. Романовская – определение методологии исследования.

Е. В. Шалавина – формирование структуры статьи, проведение расчетов, сравнение результатов.



Э. В. Васильев – постановка задачи, литературный обзор.

В. Ю. Вертянкина – формальный анализ.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 23.08.2024; поступила после рецензирования 06.09.2024;*

*принята к публикации 12.09.2024*

*About the authors:*

**Aleksandr Yu. Briukhanov**, Dr.Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, Researcher ID: B-7550-2018, Scopus ID: 57190026573, SPIN-code: 8932-5083, sznii@ya.ru

**Anna A. Romanovskaya**, Dr.Sci. (Biol.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Director, Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel (20B Glebovskaya St., Moscow 107258, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8943-170X>, Researcher ID: J-8166-2013, Scopus ID: 6603121727, SPIN-code: 3370-6390, an\_roman@igce.ru

**Ekaterina V. Shalavina**, Cand.Sc. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, Researcher ID: C-1980-2018, Scopus ID: 57190026700, SPIN-code: 4075-6888, shalavinaev@mail.ru

**Eduard V. Vasilev**, Cand. Sc. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, Scopus ID: 57190024035, SPIN-code: 9810-9439, sznii6@yandex.ru

**Victoria Yu. Vertyankina**, Researcher of the Department of Monitoring Greenhouse Gas Fluxes in Natural and Human-Disturbed Ecosystems, Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel (20B Glebovskaya St., Moscow 107258, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3934-7872>, Researcher ID: Y-8301-2018, SPIN-code: 6487-8721, victoria\_vert@mail.ru

*Authors contribution:*

A. Yu. Briukhanov – study concept and guidance.

A. A. Romanovskaya – methodology.

E. V. Shalavina – structure of the manuscript, calculations, comparison of results.

E.V. Vasilev – task setting, literature review.

V. Yu. Vertyankina – formal analysis.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 23.08.2024; revised 06.09.2024; accepted 12.09.2024*





<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

ISSN Print 2658-4123

EDN: <https://elibrary.ru/jhhijg>

ISSN Online 2658-6525

УДК 666:629.3.0835.5:631.3

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



## Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники

П. В. Сенин, М. Н. Чаткин, Е. А. Кильмяшкин✉

Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ [40252@mail.ru](mailto:40252@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** В статье поднимается проблематика ремонта современной сельскохозяйственной техники. Из-за усложнения конструкций узлов машин возникает проблема отказа входящих в большое количество в их состав деталей. Зачастую эти детали производители отдельно не продают, что делает невозможным ремонт вышедших из строя узлов. В этом случае требуется покупка узла в сборе. Существующая проблема поставок запасных частей значительно усугубляет состояние вопроса. Увеличивается время устранения отказа, что негативно сказывается на рентабельности производства из-за крайне ограниченного времени на выполнение большинства сельскохозяйственных работ. Решение вопроса с поставками запчастей, снижение стоимости ремонта и времени простоя предлагаются в самостоятельном производстве деталей с использованием аддитивных технологий.

**Цель исследования.** Изучение полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати, вакуумного литья в силиконовые формы для уменьшения расходов на реновацию технических средств в агропромышленном комплексе. **Материалы и методы.** Аддитивная технология – метод послойного выращивания объектов. Оборудование, применяемое в данной технологии, включает в себя компьютер, 3D-принтер, 3D-сканер. 3D-принтер, основываясь на данных CAD-модели, распределяет материал на поверхности построения, где с помощью различных технологий (спекания, склеивания или расплавления) придает форму будущей детали. 3D-сканер позволяет создать трехмерную CAD-модель существующей детали для дальнейшей обработки с целью усовершенствования, модернизации, расширения или просто копирования с возможностью последующей распечатки. Помимо производства изделий 3D-печатью очень популярно направление вакуумного литья полимеров в силиконовые формы. Данная технология может использоваться в качестве мастер-модели прототипы, распечатанные на 3D-принтере или полученные классическим способом производства.

**Результаты исследования.** Для исследования состояния вопроса использовался материал, полученный в НИР на базе Центра проектирования и быстрого прототипирования «Рапид-Про» Национального исследовательского Мордовского государственного университета. Полагаясь на статистические данные за последние 5 лет, пришли к выводу, что изучение всех видов работ цикла аддитивного производства в последнее время становится актуальным. Наблюдается тенденция увеличения спроса на услугу 3D-сканирования и реверс-инжиниринг.

**Обсуждение и заключение.** Использование аддитивных технологий позволяет быстро изготовить детали любой сложности и существенно сократить время научных исследований и проектирования. Для этого необходимо создавать в образовательных, производственных и научных учреждениях специальные участки, сектора и центры,

© Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмяшкин Е. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



оснащенные оборудованием, позволяющим работать в области аддитивного производства. Проблему осложняет отсутствие подготовленных кадров, базовых знаний об аддитивных технологиях и навыков использования имеющегося оборудования и связанного с ним производства. Это существенно снижает скорость внедрения в ремонтные предприятия указанных технологий и создания соответствующих участков на предприятиях агропромышленного комплекса, что требует обучения специалистов и проведения переподготовки.

**Ключевые слова:** 3D-печать, 3D-сканирование, реверс-инжиниринг, аддитивная технология, литье

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности:** авторы выражают признательность сторонним участникам, которые внесли определенный вклад в исследование.

**Для цитирования:** Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмяшкин Е. А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

## Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment

P. V. Senin, M. N. Chatkin, E. A. Kilmyashkin✉

National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)

✉ 40252@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** The article raises the issue of repairing modern agricultural machinery. Because of increasing the complexity of the design of machine components, there is a problem of failure of their parts. Manufacturers often do not sell these parts separately that makes it impossible to repair failed machine components. In this case, the purchase of a machine component assembly is required. The problem of supplying service parts is very significant. This significantly increases the repair time that negatively affects the agricultural production profitability due to the extremely limited time for farming operations. A solution to the issue of supplying service parts, reducing the cost of repairs and breakdown time is in the independent production of parts using additive technologies.

**Aim of the Study.** The study is aimed at examining the complete cycle of additive manufacturing using 3D scanning, 3D printing, and vacuum casting in silicone molds to reduce the renovation cost of technical equipment for agriculture.

**Materials and Methods.** Additive manufacturing is a technology for creating three-dimensional objects through layer-by-layer building. In this technology, there are used a computer, 3D printer and 3D scanner. The 3D printer, based on the CAM model data, distributes the material on the construction surface, and through various sintering or melting technologies, gives the shape of the future part. A 3D scanner allows creating a three-dimensional model of the finished product for subsequent improvement, modernization, expansion or simply copying with the possibility of subsequent printing. In addition to the production of parts by 3D printing, vacuum casting of polymers into silicone molds is very popular. This technology can use prototypes printed on a 3D printer or obtained using a classical production method as a master model.

**Results.** To study the state of the issue, we have used research materials of the Design and Rapid Prototyping Technology Center “RAPID-PRO” of the National Research N.P. Ogarev Mordovia State University. Analyzing the statistical data over the past 5 years, we have concluded that the demand for all types of work in the additive manufacturing cycle has recently become urgent. There is a trend of increasing demand for 3D scanning and reverse engineering services.

*Discussion and Conclusion.* The use of additive technologies makes it possible to produce quickly the parts of any complexity and therefore to reduce significantly the time for scientific research and design. At scientific, educational and industrial institutions special sectors, there should be created areas and centers, equipped for working in the field of additive manufacturing. However, the lack of trained personnel, the lack of basic knowledge about additive technologies and skills in using the equipment significantly reduces the speed of implementation of these technologies at the repair facilities of the agricultural sector and requires retraining and training of specialists.

**Keywords:** 3D printing, 3D scanning, reverse engineering, additive technology, casting

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank the external participants who made significant contributions to the study.

**For citation:** Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

**Введение.** Наряду с большим количеством так называемых классических технологий производства и ремонта в последнее время активно развиваются новые, к которым относятся аддитивные технологии.

Классический способ заключается в следующем: из поступающих в производство заготовок с помощью процессов литья,ковки,штамповки,металлообработки формируются будущие изделия. Использование режущего инструмента приводит к перерасходу материала заготовки, что увеличивает затраты на процесс. Изделия также подвергаются термической обработке: отжигу, нормализации, закалке или отпуску. Для придания требуемых свойств поверхностям изделий применяют механические, электрофизические и физико-химические процессы.

Традиционное производство с помощью различных методов позволяет создавать как универсальные, так и сложные узкоспециализированные изделия с заранее заданными характеристиками. Сырье, используемое при производстве металлических и пластиковых изделий, сравнительно недорогое. Но получение продукции сложной геометрической формы с высокими требованиями к точности изготовления приводят к необходимости применения сложного и достаточно дорогостоящего оборудования. Стоимость напрямую зависит от точности обработки и производительности. Производство деталей сложной формы требует большого количества операций и перехода с одного типа оборудования на другой. Для классического метода характерна низкая «гибкость» производства, поскольку изменение номенклатуры выпускаемой продукции требует перенастройки оборудования, написания новых управляющих программ, а в некоторых случаях – переобучения персонала.

Аддитивное производство – технологии создания трехмерных объектов посредством послойного наращивания. Здесь в качестве материала используется мелкодисперсный порошок, листовый материал и т. д., сделанные как из различных металлов, так и полимеров. В качестве оборудования используется 3D-принтер. На основании данных САД-модели происходит распределение материала на поверхности, где посредством различных технологий спекания или расплавления он принимает форму будущей детали.

Стоимость изделий зависит от применяемого материала. На сегодняшний день наиболее дорогими являются изделия из металла. Высокая стоимость таких изделий в большей степени обусловлена применением дорогостоящего оборудования и материалов. Но 3D-принтеры, работающие с полимерными материалами, позволяют получить продукцию с достаточно низкой себестоимостью, что делает их на сегодняшний день наиболее доступными и распространенными. Для 3D-принтера нет ограничений в воспроизведении деталей по форме, точности и сложности. Применение данной технологии значительно сокращает расход материала и время производства.

В статье проведен анализ аддитивных технологий с применением полимеров как наиболее доступных на сегодняшний день материалов.

Помимо производства изделий 3D-печатью очень популярно направление вакуумного литья полимеров в силиконовые формы. Данная технология может использоваться в качестве мастер-модели. Прототипами являются распечатанные на 3D-принтере или полученные классическим способом производства модели. Мастер-модель определяет качество всего тиража, поэтому к ее разработке выдвигаются серьезные требования.

Целью исследования является изучение полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати, вакуумного литья в силиконовые формы и возможности его применения в агропромышленном комплексе (АПК) с целью уменьшения расходов на реновацию технических средств.

**Обзор литературы.** В аддитивном производстве-технологии создания трехмерных объектов посредством послойного наращивания [1; 2] в качестве конструкционного материала используется мелкодисперсный порошок, листовый материал и т. д., сделанные как из различных металлов, так и неметаллов<sup>1</sup>. Оборудованием является 3D-принтер [3; 4]. Разнообразие применяемых в последнее время материалов при 3D-печати позволяет изготавливать изделия с различными характеристиками, но лишь в некоторых случаях делает полученные детали пригодными для использования непосредственно в узлах машин. Особенно востребованной является печать деталей из металла. Это стало возможным благодаря разработке более совершенных технологий печати [5; 6]. К сожалению, такие способы изготовления деталей из металла на сегодняшний день все еще достаточно редко можно встретить на предприятиях. Причиной тому является очень высокая стоимость оборудования, расходных материалов и в целом всего технологического процесса [7]. Однако в работе [8] авторы, исследуя применение технологии стереолитографии с использованием в качестве материала для печати фотополимера, утверждают, что вполне целесообразно применять дорогие технологии в аддитивном производстве, так как в конечном результате материальные и временные расходы снижаются. Проводя сравнительный анализ 3D-печати и технологии вакуумного литья полимеров в силиконовые формы, можно заключить, что для выпуска многомиллионных партий деталей такая технология не подойдет, так как в этом случае используют пресс-формы (металлические оснастки). Это дорогостоящее

<sup>1</sup> Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

решение, на реализацию которого уходит много времени и средств. Воспользоваться этой технологией [9] можно, если необходимо изготовить небольшое количество изделий (до 10–1 000 ед.). В технологии литья в силиконовые формы применяются двухкомпонентные полиуретаны, которые после полимеризации начинают обладать различными свойствами. Отливки из полиуретанов могут имитировать механические свойства АБС (результат совместной полимеризации акрилонитрила, бутадиена и стирола), РР (полипропилена), ПА12 (полиамида) или эластомеров с различной твердостью [10]. Оптические детали могут быть изготовлены из прозрачных полиуретанов с возможностью тонирования. Литьем в силикон можно получить термостойкие, гибкие или предназначенные для пищевого применения детали.

3D-печать необходима как средство производства прототипов<sup>2</sup> [11], но как средство мелкосерийного производства, на наш взгляд, не совсем подходит ввиду высокой стоимости, низкой производительности и ограниченности номенклатуры материалов печати (не всегда возможно получить изделие с требуемыми физико-механическими свойствами). В зависимости от применяемой технологии печати, получаемые изделия зачастую не пригодны для восприятия внешних нагрузок из-за высокой пористости и низкой межслойной адгезии, слабой стойкости к агрессивной внешней среде [12; 13].

Литье в силиконовые формы позволяет в короткие сроки изготовить небольшие партии изделий высокого качества с требуемыми свойствами материала. Стоимость изделий зависит от партии: чем она больше, тем ниже цена. Единичное изготовление данной технологией экономически не целесообразно.

Наряду с рассмотренными технологиями необходимо отметить и 3D-сканирование [14]. Эта технология позволяет создавать пространственные модели объектов в виде цифровых моделей (САD-модель). Полученные модели деталей можно изменять, усовершенствовать или просто копировать.

Сканирующее оборудование имеет достаточно высокую точность (менее 10–15 микрон), что позволяет проводить сравнительный анализ проектной документации (исходной САD-модели) и произведенных деталей на наличие отклонений размеров и форм [15].

Сканирование позволяет создавать необходимую проектную документацию для дальнейшего использования в производстве (особенно в производстве деталей со сложной геометрической формой). 3D-сканирование широко используется в различных инженерных расчетах [16; 17].

Проведя анализ литературы, отметим, что в большей части авторами рассматриваются отдельно взятые технологии и этапы аддитивного производства. В целом же примеров полного технологического процесса от проектирования до получения конечного товарного продукта крайне мало. В одной из таких работ приведено проектирование, прототипирование и испытание в реальных условиях адаптивного центробежного рабочего органа разбрасывателя удобрений [18].

<sup>2</sup> Федоренко В. Ф., Голубев И. Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники. 2-е изд. М. : Юрайт, 2024. 137 с.; Возможности применения 3D-технологий в ремонтном производстве / Ю. В. Башкирцев [и др.]. М.: ФГБОУ «РИИАМА», 2020. 44 с.

**Материалы и методы.** На сегодняшний день в научных, образовательных и производственных учреждениях нужно создавать подразделения с определенным оснащением, позволяющим работать в сфере аддитивных технологий.

В последнее время на базе производств и учебных заведений создаются и уже функционируют подразделения, работающие в области аддитивных технологий. Такие Центры в своем оснащении используют высокотехнологичное оборудование, позволяющее заниматься не только проектированием, но и производством готовых изделий. Например, в госкорпорации РОСАТОМ реализуется бизнес-направление «Аддитивные технологии», в рамках которого созданы Центры аддитивных технологий общего доступа (ЦАТОД) с функциями обучения. В 2015 г. на базе Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета был создан Центр проектирования и быстрого прототипирования «Рапид Про».

Центр включает в себя обучающий класс, участок быстрого прототипирования и проектирования, участок производства. Здесь осуществляется разработка программ по обучению и повышению квалификации специалистов, планирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области цифровых технологий, разработки цифровых моделей деталей и узлов, изготовление прототипов деталей, опытное производство нестандартных деталей.

Основной задачей Центра является разработка и реализация полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати, вакуумного литья в силиконовые формы.

Данное подразделение оснащено 3D-принтерами SLS- и FDM-технологии, оптическим 3D-сканером, вакуумно-литьевыми машинами и др.

На данных CAD-модели 3D-принтер распределяет материал в области построения, где методом технологий УФ-полимеризации или расплавления придает форму будущей детали. 3D-сканер позволяет создать трехмерную модель готового изделия для последующего усовершенствования, модернизации, расширения или просто копирования с возможностью последующей распечатки. Помимо производства изделий 3D-печатью в Центре используется вакуумное литье полимеров в силиконовые формы. В данной технологии в качестве мастер-модели могут использоваться прототипы, распечатанные на 3D-принтере или полученные классическим способом производства.

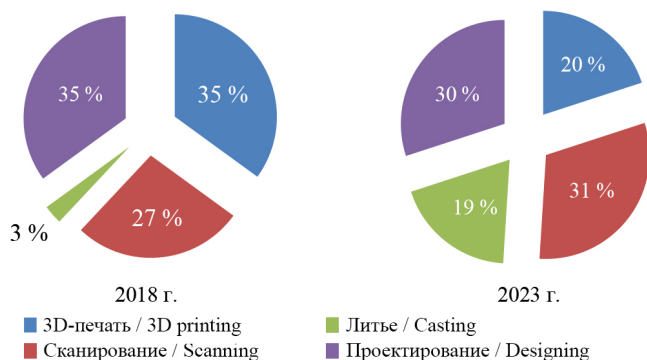
Имеющееся оборудование и технологии позволяют получать изделия только из пластика. Широкая номенклатура деталей из полимеров, применяемых в узлах современных машин, пользуется большим спросом, и производство вышедших из строя пластиковых изделий очень востребовано. При использовании технологии вакуумного литья полимеров в силиконовые формы можно получить детали с различными физико-механическими свойствами ввиду большого разнообразия используемых полимеров, что делает возможным использование изготовленных образцов не в качестве прототипов, а уже непосредственно в рабочей машине.

**Результаты исследования.** Проводя анализ состояния оснащения предприятий оборудованием для аддитивного производства и его использования в производственном процессе, можно заключить, что скорость их внедрения существенно

затруднена. Оборудование есть, но оно в полной мере не используется, либо его нет, и есть необходимость в его приобретении. Причиной такого состояния вопроса является отсутствие подготовленных специалистов, базовых знаний об аддитивных технологиях и навыков использования оборудования связанного с ним.

Для решения сложившейся проблемы в Центре «Рапид Про» разработана учебная программа «Технологии и средства быстрого прототипирования в машиностроении». В рамках этой программы сотрудники Центра систематически проводят повышение квалификации специалистов предприятий, в том числе АПК.

За время существования Центра было разработано множество проектной документации, прототипов для ряда научно-исследовательских работ, произведено большое количество функциональных деталей мелкими сериями.



Р и с. 1. Статистика востребованности услуг с 2018 по 2023 г.

F i g. 1. Statistics on demand for services from 2018 to 2023

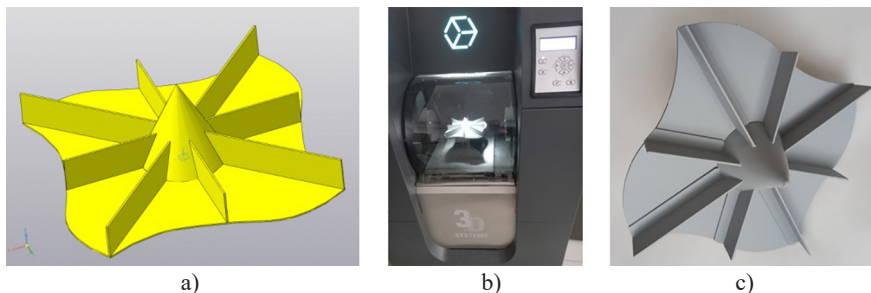
Источник: составлено авторами статьи.  
Source: compiled by the authors of the article.

Анализируя статистические данные нашей работы (рис. 1) за последние 5 лет, мы можем заключить, что востребованность всех видов работ цикла аддитивного производства в последнее время становится примерно одинаковой. Наблюдается тенденция увеличения спроса на услугу 3D-сканирования и реверс-инжиниринг. В современных условиях санкционного давления со стороны западных стран проблема обеспечения запчастями для иностранной техники стоит очень остро. Многие отечественные производители готовы сосредоточить свое производство на выпуске наиболее востребованных деталей. Однако из-за отсутствия конструкторской документации быстрая реализация невозможна, особенно если речь идет о деталях сложной геометрической формы. В данном случае основным инструментом создания такой документации является 3D-сканер.

Наличие большой номенклатуры оборудования в рамках одного центра позволяет охватить весь спектр работ и сделать технологический процесс аддитивного производства замкнутым (от проектирования до товарного продукта).

Примерами научно-исследовательских работ Центра являются разработки:

1) центробежного адаптивного рабочего органа для внесения минеральных удобрений [18] (рис. 2).

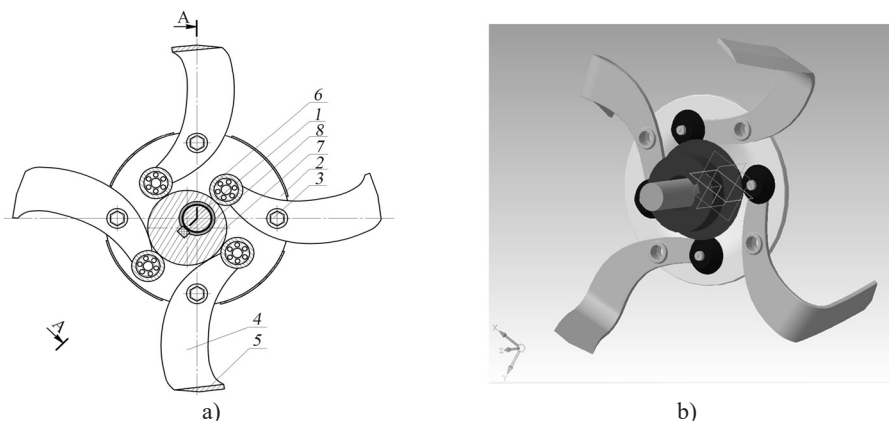


Р и с. 2. Прототипирование центробежного адаптивного рабочего органа: а) 3D-модель; б) распечатка на 3D-принтере ProJet 3000; в) прототип рабочего органа из пластика

F i g. 2. Prototyping a centrifugal adaptive working element: а) 3D model; б) printout on a ProJet 3000 3D printer; в) prototype of the working element made of plastic

Источники: составлено по материалам [18].  
Source: compiled from materials [18].

2) почвообрабатывающей фрезы (рис. 3), обеспечивающей постоянство угла резания во всем диапазоне изменения ее поступательной скорости, обусловленного физико-механическими свойствами почвы.



Р и с. 3. Конструкция фрезерного рабочего органа с механизмом регулирования угла резания: а) схема фрезы: 1 – основной вал; 2 – водило; 3 – ось; 4 – шатун; 5 – нож; 6 – конический ролик; 7 – кулачок; 8 – корпус; б) 3D-фрагмент фрезы

F i g. 3. Construction of a milling working element with a mechanism for adjusting the cutting angle: а) milling cutter diagram: 1 – main shaft; 2 – carrier; 3 – axle; 4 – connecting rod; 5 – knife; 6 – tapered roller; 7 – cam; 8 – housing; б) the model is built with the use of the KOMPAS-3D program

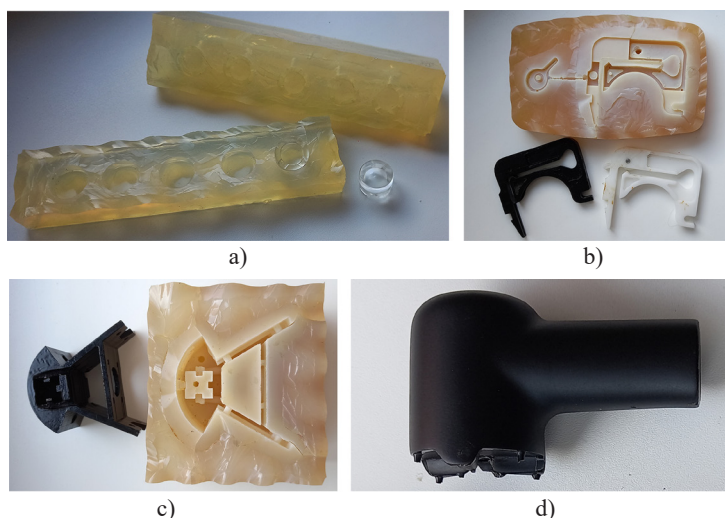
Источники: а) составлено по материалам Международной научно-практической конференции<sup>3</sup>; б) модель построена в программе КОМПАС-3D.

Source: а) compiled based on materials from the International Scientific and Practical Conference; б) the model is built with the use of the KOMPAS-3D program.

<sup>3</sup> Князьков А. С., Кильмяшкин Е. А. Использование 3D-технологий для физического моделирования рабочих органов почвообрабатывающих фрез / Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти проф. С. А. Лапшина (20 – 21 апреля 2017 г., г. Саранск). Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 448–452. URL: <https://mrsu.ru/upload/iblock/386/Lapshinskiie-chteniya-13.pdf> (дата обращения: 25.05.2024).



На базе Центра систематически выполняются работы по производству деталей мелкими сериями и созданию прототипов (рис. 4, 5). Заказчиками чаще всего выступают предприятия агропромышленного комплекса.



Р и с. 4. Мелкосерийное производство деталей методом вакуумного литья в силиконовые формы: а) линза ходовых огней трактора; б) зажим-дозатор химических реактивов установки по производству удобрений; в) элемент корпуса; д) кронштейн зеркала трактора

F i g. 4. Small-scale production of parts by vacuum casting in silicone molds: а) lens for tractor running lights; б) clamp-dispenser for chemical reagents of a fertilizer production plant; в) body element; д) bracket for tractor mirror

*Источник:* фотографии сделаны Е. А. Кильмяшкиным при испытаниях метода вакуумного литья в силиконовые формы в Центре проектирования и быстрого прототипирования «Рapid Про» (2018–2023 гг.).

*Source:* the photographs have been taken by the E. A. Kilmyashkin during the tests of the vacuum casting method in silicone molds at the Design and Rapid Prototyping Center “RAPID-PRO” (2018–2023).



Р и с. 5. Прототипы, изготовленные на 3D-принтере: а) крышка гидрораспределителя; б) корпус электронного блока; в) корпус вакуумного дозатора доильной установки

F i g. 5. 3D printed prototypes: а) hydraulic distributor cover; б) electronic unit housing; в) milking machine vacuum dispenser housing

*Источник:* фотографии сделаны Е. А. Кильмяшкиным при испытаниях метода 3D-печати в Центре проектирования и быстрого прототипирования «Рapid Про» (2018–2023 гг.).

*Source:* the photographs have been taken by the E. A. Kilmyashkin during testing the 3D printing method at the Design and Rapid Prototyping Center “RAPID-PRO” (2018–2023).



**Обсуждение и заключение.** Использование наукоемких современных технологий аддитивного производства и вакуумного литья в силиконовые формы должно значительно повлиять на процесс восстановления работоспособности устройств, особенно импортного производства. Каждая технология используется индивидуально на этапе проектирования, прототипирования и производства небольших серий деталей. Отсутствие требуемой номенклатуры запасных частей или отремонтированных деталей приводит к простоям машин и систем, что является причиной значительных экономических издержек. Использование аддитивных технологий позволяет частично решить эти проблемы, быстро изготовить детали любой сложности и существенно сократить время на их производство. Все вышперечисленные преимущества аддитивных технологий создают на них спрос, что приводит к необходимости создания в образовательных, научных и производственных учреждениях специальных участков, секторов и центров, оснащенных оборудованием, позволяющим работать в этой области. Однако отсутствие подготовленных кадров с базовыми знаниями об аддитивных технологиях и с навыками использования соответствующего оборудования существенно снижает скорость их внедрения в ремонтное производство в аграрном секторе экономики. Для внедрения аддитивных технологий в производство и ремонт сельскохозяйственной техники требуется обучение соответствующих специалистов и проведение переподготовки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литунов С. Н., Слободенюк В. С., Мельников Д. В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 // Омский научный вестник. 2016. № 1 (145). С. 12–17. URL: <https://clck.ru/3DXM4T> (дата обращения: 26.06.2024).
2. Katkar R. A., Taft R. M., Grant G. T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing) // Dental Clinics of North America. 2018. Vol. 62, Issue 3. P. 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
3. Мальцева О. В. Развитие мирового рынка 3D-принтеров // Российский внешнеэкономический вестник. 2018. № 9. С. 88–97. URL: <https://journal.vavt.ru/rfej/article/view/1610> (дата обращения: 17.06.2024).
4. Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling / F. Ning [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2015. Vol. 80. P. 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
5. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges / T. D. Ngo [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
6. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Overtraditional Manufacturing // Business Horizons. 2017. Vol. 60, Issue 5. P. 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
7. Анализ аддитивного оборудования для 3D-печати деталей / И. Г. Голубев [и др.] //Технический сервис машин. 2019. №1 (134). С. 194–200. EDN: [ZCGKHB](https://www.edn.ru/ZCGKHB)
8. Suryatal B. K., Sarawade S. S., Deshmukh S. P. Fabrication of Medium Scale 3D Components Using Stereolithography System for Rapid Prototyping // Jornal of King Saud Univercity – Engineering Sciences. 2023. Vol. 35, Issue 1. P. 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.012>
9. Kuo Ch.-Ch., Chen Y.-R. Rapid Optical Inspection of Bubbles in the Silicone Rubber // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. 2013. Vol. 124, Issue 13. P. 1480–1485.

10. Антибас И. П., Дьяченко А. Г. Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 366–378. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378>
11. Karande A. M., Kalbande D. R. Weight Assignment Algorithms for Designing Fully Connected Neural Network // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2018. Vol. 10, No. 6. P. 68–76. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.08>
12. Sanatgar R. H., Campagne C., Nierstrasz V. Investigation of the Adhesion Properties of Direct 3D Printing of Polymers and Nanocomposites on Textiles: Effect of FDM Printing Process Parameters // Applied Surface Science. 2017. Vol. 403. P. 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.112>
13. Dev S., Srivastava R. Experimental Investigation and Optimization of FDM Process Parameters for Material and Mechanical Strength // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 26. Part 2. P. 1995–1999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.435>
14. Перспективы применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники / И. Г. Голубев [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 214–219. EDN: YVGNHL
15. Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation / A. Ahmad [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, Issue 3. P. 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.116>
16. Нефёлов И. С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий // Ремонт, восстановление, модернизация. 2018. № 11. С. 15–17. <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
17. Скороходов Д. М. Влияние факторов на точность контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники автоматизированным измерительным устройством // Агроинженерия. 2018. № 2 (84). С. 44–49. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-44-49>
18. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования / В. А. Овчинников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 222–234. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

## REFERENCES

1. Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. [Review and Analysis of Additive Technologies. Part 1]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2016;1(145):12–17. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3DXM4T> (accessed 26.06.2024).
2. Katkar R.A., Taft R.M., Grant G.T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dental Clinics of North America*. 2018;62(3):393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
3. Mal'tseva O.V. World Market Development for 3D Printers. *Russian Foreign Economic Journal*. 2018;9:88–97. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journal.vavt.ru/rfej/article/view/1610> (accessed 17.06.2024).
4. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S. Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling. *Composites Part B: Engineering*. 2015;80:369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;143:172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
6. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
7. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I., Spitsyn I.A. Analysis of Additive Equipment for 3D Printing of Parts. *Technical Servis of Cars*. 2019;1(134):194–200. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZCGKHB

8. Suryatal B.K., Sarawade S.S., Deshmukh S.P. Fabrication of Medium Scale 3D Components Using Stereolithography System for Rapid Prototyping. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2023;35(1):40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.012>
9. Ch.-Ch. Kuo, Y.-R. Chen Rapid Optical Inspection of Bubbles in the Silicone Rubber. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 2013;124(13):1480–1485.
10. Antypas I.R., Dyachenko A.G. Modeling, Studying and Manufacturing a Cultivator Rack from Composite Materials. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(3):366–378. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378>
11. Karande A.M., Kalbande D.R. Weight Assignment Algorithms for Designing Fully Connected Neural Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018;10(6):68–76. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.08>
12. Sanatgar R.H., Campagne C., Nierstrasz V. Investigation of the Adhesion Properties of Direct 3D Printing of Polymers and Nanocomposites on Textiles: Effect of FDM Printing Process Parameters. *Applied Surface Science*. 2017;403:551–563. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.112>
13. Dev S., Srivastava R. Experimental Investigation and Optimization of FDM Process Parameters for Material and Mechanical Strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):1995–1999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.435>
14. Golubev I.G., Spitsyn I.A., Bykov V.V., Golubev M.I. Prospects of Application of Additive Technologies in the Repair of Agricultural Machinery. *Proceedings of GOSNITI*. 2018;130:214–219. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YVGNHL
15. Ahmad A., Darmoul S., Ameen W., Abidi M.H., Al-Ahmari A.M. Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(3):412–417. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.116>
16. Nefelov I.S. [Restoration of Worn-Out Machine Parts Using Additional Repair Parts Manufactured Using Additive Technologies]. *Repair, Restoration, Modernization*. 2018;11:15–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
17. Skorokhodov D.M. Determinants of Quality Control Accuracy of Automated Measuring Device for Spare Parts of Agricultural Machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2018;2(84):44–49. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-44-49>
18. Ovchinnikov V.A., Kilmlyashkin E.A., Knyazkov A.S., Ovchinnikova A.V., Zhalin N.A., Zysin E.S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

*Об авторах:*

**Сенин Петр Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-код: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

**Чаткин Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, SPIN-код: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

**Кильмяшкин Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, SPIN-код: 6497-0730, 40252@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

П. В. Сенин – постановка задач исследования, общее руководство.

М. Н. Чаткин – общее руководство, формулировка выводов.

Е. А. Кильмашкин – теоретический анализ, формулировка выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 24.07.2024; поступила после рецензирования 16.08.2024;  
принята к публикации 23.08.2024*

*About the authors:*

**Petr V. Senin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-code: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

**Mikhail N. Chatkin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, SPIN-code: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

**Eugen A. Kilmyshkin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, SPIN-code: 6497-0730, 40252@mail.ru

*Authors contribution:*

P. V. Senin – formulation of research objectives, general management.

M. N. Chatkin – general management, formulation of conclusions.

E. A. Kilmyashkin – theoretical analysis, formulation of conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 24.07.2024; revised 16.08.2024; accepted 23.08.2024*



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.597-614>

EDN: <https://elibrary.ru/kwyhah>

УДК 678:004.021:004.032.2

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



## Алгоритм поиска оптимального режима подачи регулятора в процессе получения полимерных продуктов

Э. Н. Мифтахов ✉

Уфимский университет науки и технологий  
(г. Уфа, Российская Федерация)

✉ [promif@mail.ru](mailto:promif@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Высокий спрос на полимерную продукцию обеспечивает необходимость постоянной модернизации технологических аспектов ее производства, повышение эффективности которого невозможно без модельного описания и решения задач оптимизации его основных технологических стадий. В условиях имеющихся сегодня потребностей по получению продуктов с заданной структурой и свойствами вопрос по созданию инструментов решения задач оптимизации является весьма актуальным. Одним из инструментов управления молекулярной массой продукта является использование режима дробной подачи регулятора, состав и дозировка которого часто подобраны эмпирически.

**Цель исследования.** Разработка методов и алгоритмов, позволяющих определить режим многоточечной подачи регулятора в непрерывном производстве полимерных продуктов с целью формирования заданных молекулярных характеристик.

**Материалы и методы.** Для решения задачи поиска оптимального режима подачи регулятора используется эвристический подход, представленный генетическим алгоритмом оптимизации. Данный алгоритм основан на механизме создания популяции потенциальных решений, которые подвергаются операциям скрещивания, мутации и отбора, имитируя процессы наследования и эволюции в природе. С целью оценки молекулярных характеристик продукта сополимеризации применяется кинетический подход к моделированию, основанный на использовании моментов молекулярно-массового распределения. Для математического описания непрерывного производства используются рекуррентные соотношения, характеризующие перенос реакционной массы между реакторами идеального перемешивания.

**Результаты исследования.** Согласно условиям организации непрерывного производства добавление регулятора возможно в начале процесса, а также в третьей и шестой по ходу батареи полимеризаторы. С целью определения режима подачи регулятора критерий оптимизации был сформирован в виде функционала, отражающего абсолютную разницу расчетных и заданных значений среднечисленной и среднемассовой молекулярных масс. Программная реализация разработанного метода и алгоритма оптимизации, проведенные вычислительные испытания позволили идентифицировать ряд решений, каждое из которых способствует получению продукта с заданными молекулярными характеристиками. Визуализация части полученных решений демонстрирует различную динамику молекулярной массы в течение всего процесса.

**Обсуждение и заключение.** С использованием разработанного метода и алгоритма была решена задача идентификации режима трехточечного регулирования молекулярной массы для непрерывного процесса получения бутадиев-стирольного сополимера. Выбор генетического алгоритма при исследовании и оптимизации сложных

© Мифтахов Э. Н., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

многофакторных физико-химических систем обоснован тем, что он позволяет осуществлять поиск одного или нескольких параметров системы как в дискретном, так и непрерывном множестве переменных и способствует нахождению глобального оптимума благодаря случайному характеру при поиске решений. Разнообразие полученных решений задачи дает возможность управления процессом синтеза полимеров в случае постоянного мониторинга физико-химических характеристик продукта.

**Ключевые слова:** бутадиен-стирольный сополимер, молекулярные характеристики, кинетический подход, регулятор, оптимизация, генетический алгоритм

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00380 (<https://rscf.ru/project/24-21-00380/>).

**Для цитирования:** Мифтахов Э. Н. Алгоритм поиска оптимального режима подачи регулятора в процессе получения полимерных продуктов // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 597–614. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.597-614>

## Algorithm for Searching the Optimal Regulator Supply Mode in the Process of Manufacturing Polymer Products

E. N. Miftakhov✉

*Ufa University of Science and Technology  
(Ufa, Russian Federation)*

✉ [promif@mail.ru](mailto:promif@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The high demand for polymer products creates the need for constant modernization of the technological aspects of their production, increasing the efficiency of which is impossible without a model description and solving problems of optimization of its main technological stages. The current needs for manufacturing the products with a specified structure and properties make the issue of creating tools for solving optimization problems very relevant. One of the tools for controlling the product molecular weight is using the fractional mode to supply a regulator, the composition and dosage of which are often selected empirically.

**Aim of the Study.** The aim of the study is to develop methods and algorithms to determine the mode for multipoint supplying a regulator in the continuous-running manufacturing of polymer products with specified molecular characteristics.

**Materials and Methods.** To choose the optimal regulator supply mode, there is used a heuristic method represented by a genetic optimization algorithm. This algorithm is based on the mechanism for creating a population of potential solutions that are subjected to the operations of crossing, mutation and selection imitating the processes of inheritance and evolution in nature. To assess the molecular characteristics of the copolymerization product, there is applied a kinetic modeling approach based on the use of molecular weight distribution moments. For a mathematical description of continuous-running production, there are used recurrent relations characterizing the transfer of the reaction mass between ideally mixed reactors.

**Results.** According to the conditions for organizing continuous-running manufacturing, it is possible to add a regulator at the beginning of the process in the third and sixth polymerizers along the battery. In order to determine the regulator supply mode, the optimization criterion was developed in the form of a functional reflecting the absolute difference between the calculated and specified values of the number-average and mass-average molecular weights. The software implementation of the developed method and optimization



algorithm, and the computational tests carried out made it possible to identify a number of solutions, each of which contributes to manufacturing a product with specified molecular characteristics. Visualization of some resulting solutions demonstrates different molecular weight dynamics throughout the process.

*Discussion and Conclusion.* Through using the developed method and algorithm, there has been solved the problem of identifying the three-point molecular weight control regime for the continuous-running process of producing styrene-butadiene copolymer. The choice of a genetic algorithm for the study and optimization of complex multifactorial physico-chemical systems is justified by the fact that it allows searching for one or more system parameters in both a discrete and continuous set of variables and contributes to finding a global optimum due to the random nature in the search for solutions. The variety of solutions obtained for the problem makes it possible to control the process of polymer synthesis in the case of constant monitoring of the physicochemical characteristics of the product.

**Keywords:** butadiene-styrene copolymer, molecular characteristics, kinetic approach, regulator, optimization, genetic algorithm

**Conflict of interest:** The author declares no conflict of interest.

**Funding:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 24-21-00380 (<https://rscf.ru/en/project/24-21-00380/>).

**For citation:** Miftakhov E.N. Algorithm for Searching the Optimal Regulator Supply Mode in the Process of Manufacturing Polymer Products. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):597–614. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.597-614>

**Введение.** В условиях развития химических технологий синтез высокомолекулярных соединений становится важнейшей составляющей современной промышленности и играет ключевую роль в создании широкого спектра материалов: от пластиков и каучуков до композитов высокой прочности. Данные процессы обладают сложной динамикой, требующей тщательного планирования и контроля на всех этапах производства<sup>1</sup>.

Образующиеся полимерные продукты оценивают по молекулярным характеристикам, на численное представление которых влияют как соотношение используемой реакционной смеси, так и технологические параметры непрерывного производства. С целью ограничения чрезмерного роста молекулярной массы в полимеризационную массу добавляются регулирующие примеси [1], взаимодействующие с активными центрами полимеризации и способствующие принудительному обрыву образующихся макромолекул.

Дозировка таких примесей часто определена эмпирически, а многоточечная подача позволяет нивелировать ее стремительный расход и влияние на рост молекулярной массы полимерного продукта. Вопрос определения соответствующих дозировок и режима подачи регулятора, позволяющего получить продукт с заданными свойствами, является актуальным и не теряет своей практической значимости.

Целью данной работы является разработка методов и алгоритмов, позволяющих находить оптимальные режимы регулирования процессов синтеза полимеров, способствующие достижению заданных молекулярно-массовых характеристик.

<sup>1</sup> Кирпичников П. А., Береснев В. В., Попова Л. М. Альбом технологических схем основных производств промышленности синтетического каучука. Ленинград : Химия, 1986. 224 с.; Васильев В. А., Насыров И. Ш. Отечественные промышленные стереорегулярные каучуки. Исследования и разработки : моногр. Уфа, 2018. 288 с.



**Обзор литературы.** Сложная структура высокомолекулярных соединений и нетривиальный характер протекания элементарных реакций определяют необходимость использования эффективных методов моделирования, в основе которых лежит изучение основного кинетического механизма процесса. Концепция моделирования таких процессов полимеризации, основанных на известном реакционном механизме, подробно представлена в трудах отечественных<sup>2</sup> [2–4] и зарубежных исследователей [5–7]. Оценка влияния различных факторов, характерных при описании процессов в периодическом режиме производства, представлена в работах [8; 9].

С целью эмпирической оценки молекулярных характеристик полимерных продуктов возможно использование как кинетического [2; 10; 11], так и статистического подходов [12–14] к моделированию. В основе кинетического подхода лежит разработка математических моделей, описывающих изменение концентрации различных компонентов системы от времени, и последующее прогнозирование основных молекулярных характеристик в зависимости от условий реакции и состава исходной реакционной смеси. Статистический подход основан на использовании вероятностных законов для описания и анализа различных аспектов полимеризационных процессов. Полученные в ходе реализации статистического подхода данные справедливы лишь при организации достаточно большого количества вычислительных испытаний.

Очевидно, что при описании процессов синтеза полимеров в масштабе крупнотоннажного промышленного производства требуется учитывать особенности непрерывного потока реагентов и продуктов через реактор, включая динамику изменения параметров во времени и пространстве. В условиях организации кинетического подхода это приводит к включению в математическое описание соответствующих рекуррентных соотношений, определяющих перенос реакционной массы в ходе процесса<sup>3</sup>.

При модификации статистического подхода требуется вести постоянный учет параметров, характеризующих нахождение моделируемых макромолекул в том или ином реакторе каскада<sup>4</sup>. Кроме того, объем моделируемого ансамбля макромолекул требуется увеличить кратно количеству реакторов. Как следствие, организация вычислительных испытаний с целью эмпирической оценки продукта требует колоссальных вычислительных ресурсов и практически невозможна при постановке и решении задач оптимизации с использованием статистического подхода.

В контексте решения задач управления физико-химическими процессами предпочтение отдается тем методам оптимизации, которые позволяют в ходе итерационного поиска минимизировать количество необходимых вычислительных испытаний. Эвристические методы оптимизации<sup>5</sup> оказываются особенно привлекательными в данном контексте, предоставляя необходимые инструменты

<sup>2</sup> Берлин А. А., Вольфсон С. А. Кинетический метод в синтезе полимеров. М. : Химия, 1973. 344 с.

<sup>3</sup> Подвальный С. Л., Барабанов А. В. Структурно-молекулярное моделирование непрерывных технологических процессов многоцентрированной полимеризации. Воронеж : Научная книга, 2011. 115 с.

<sup>4</sup> Rawlings J. B., Ekerdt J. G. Chemical Reactor Analysis and Design Fundamentals. Madison : Nob Hill Publishing, 2002. 610 p.

<sup>5</sup> Пантелеев А. В., Скавинская Д. В., Алёшина Е. А. Метаэвристические алгоритмы поиска оптимального программного управления. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2024. 396 с.



для анализа и улучшения реакционных механизмов, кинетических параметров и условий реакции.

Ведущее место среди эвристических методов оптимизации занимают генетические алгоритмы<sup>6</sup> [15]. Их способность исследования обширных пространств поиска решений представляет собой важное преимущество при выполнении сложных задач, включающих в себя множество возможных вариантов, что открывает вероятность их использования там, где невозможно применение классических алгоритмов. Впервые предложенные Холландом<sup>7</sup> генетические алгоритмы успешно применяются для решения задач оптимизации различного типа [16–18]. К основным недостаткам генетического алгоритма относят высокую потребность в вычислительных ресурсах при работе с крупными и сложными пространствами поиска. Однако стремительное развитие информационных технологий и облачных вычислений позволяет сегодня успешно интегрировать технологии параллельных расчетов в случае решения объемных многофакторных задач [19]. Одним из способов, позволяющих повысить эффективность алгоритма, является использование различных видов кроссоверов – операторов, применяемых к начальным решениям для осуществления генетического «скрещивания». Оценка влияния различных типов кроссоверов на скорость и точность формирования решения представлена в работах [20–22].

**Материалы и методы.** Для решения задачи поиска оптимального режима подачи регулятора будем использовать генетический алгоритм, который представляет собой метаэвристический метод решения задач оптимизации, вдохновленный процессами естественного отбора и эволюции. Данный алгоритм основан на механизме создания популяции потенциальных решений, которые подвергаются операциям скрещивания, мутации и отбора, имитируя процессы наследования и эволюции в природе. На каждом этапе реализации алгоритма производится оценка полученных решений на основании заданного критерия эффективности. Лучшие решения используются для образования дальнейших потомков. С целью программной реализации данного алгоритма опишем его основные этапы.

*Этап 1 – формирование начальной популяции.* Задается некоторая начальная популяция из  $K$  возможных решений, порядковый номер  $iter = 1$  формируемого поколения и допустимая точность решения задачи  $\varepsilon$ . Вектор начальной популяции рекомендуется сформировать из равноудаленных точек заданного начального отрезка  $[x_i, \bar{x}_i]$ :

$$X^{iter} = x_{ij}(0) = x_i + \frac{\bar{x}_i - x_i}{(K - 1)} \cdot (j - 1), \quad j = 1 \dots K.$$

*Этап 2 – оценка степени приспособленности.* Для каждого из предложенных вариантов решений рассчитывается значение целевой функции, которое определяет критерий задачи оптимизации. В частности, если критерий оптимизации определяется некоторым функционалом  $G(X)$ , который требуется минимизировать, то при выполнении условия вида

<sup>6</sup> Simon D. Evolutionary Optimization Algorithms. Wiley, John Wiley & Sons Limited, 2013. 776 p.

<sup>7</sup> Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. University of Michigan Press, 1992. 232 p.

$$G(X_j^{iter}) \leq \varepsilon, j = 1 \dots K \quad (1)$$

алгоритм следует немедленно остановить и вывести полученное решение.

*Этап 3 – выборка родителей для дальнейшей репродукции.* Для решения задачи выборки родителей с целью создания дальнейшей популяции на основании ранее полученных значений степени приспособленности рассчитывается вероятность выбора каждой особи:

$$p(X_j^{iter}) = \frac{1 - G(X_j^{iter})}{\sum_{j=1}^K (1 - G(X_j^{iter}))}$$

Если хотя бы одно из  $G(X_j^{iter})$  превышает значение 1, то для расчета вероятностей требуется провести предварительную нормализацию полученных оценок. Найденные значения вероятностей последовательно располагаются на отрезке от 0 до 1, образуя полную группу. Далее на основании генерации равномерно распределенных случайных чисел и попадания их в заданные интервалы выбираются  $K$  особей для формирования родительского пула и дальнейшей репродукции.

*Этап 4 – формирование потомков.* Из найденного родительского пула проводится процедура получения потомков с использованием одного из заранее определенных операторов кроссинговера. В частности, в случае использования арифметического кроссинговера для двух родительских особей  $X_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$  и  $X_2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$  значения вектора потомка будут определяться в соответствии с соотношением

$$y_i = a \cdot x_i^1 + (1 - a) \cdot x_i^2,$$

где

$$a = \frac{\max G(X_j)}{\max G(X_j) + \min G(X_j)}, j = 1 \dots K.$$

*Этап 5 – процедура мутации.* Данный этап необходим для внесения разнообразия в образованную популяцию и исследования различных решений в пространстве поиска. Для решения проблемы преждевременного «вырождения» вводится некоторый параметр мутации  $p_m$ , определяющий вероятность случайного изменения элементов вектора образованных потомков.

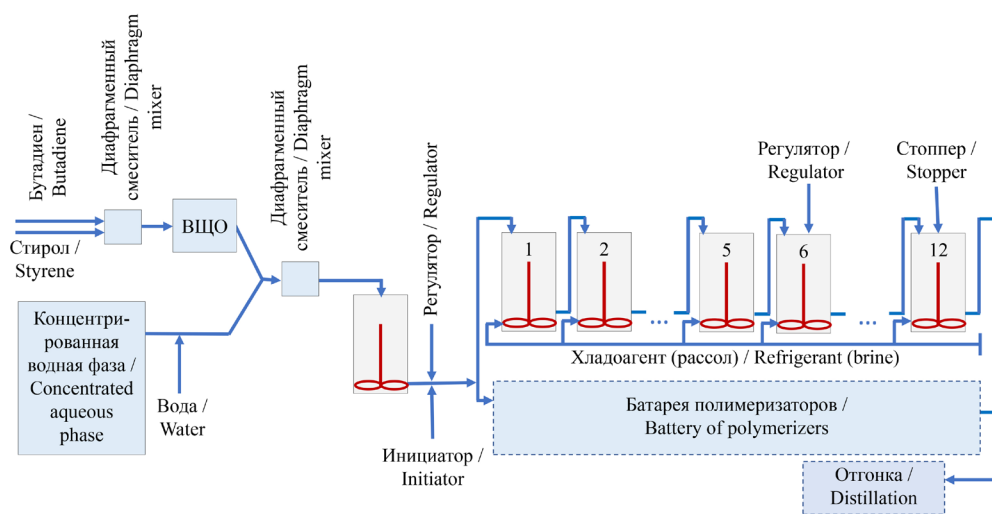
Элементы вектора, попадающие под процедуру мутации, меняются по правилу  $x_i = x_i \pm \alpha \cdot \delta$ , где  $\delta$  определяет допустимый интервал изменения, а параметр  $\alpha$  является поправочным коэффициентом и определяется в интервале от 0 до 1.

*Этап 6 – оценка новой популяции.* Для образованной популяции потомков рассчитывается значение целевой функции. В случае соответствия критерию остановки, согласно выражению (1), алгоритм следует остановить и вывести полученное решение. Иначе, перейти к 3-му этапу с целью дальнейшей репродукции потомков. Критерием остановки алгоритма может быть также достижение предельного количества итераций, задаваемого в виде отдельной переменной  $iterMAX$  и равного по умолчанию  $10^4$ .

Апробация генетического алгоритма к решению задачи оптимизации проводилась для непрерывного процесса сополимеризации бутадиена со стиролом<sup>8</sup> с целью определения оптимального режима многоточечной подачи регулятора [23], позволяющего получить продукт с заданными молекулярными характеристиками.

Образование полимера протекает по механизму инициированной радикальной полимеризации при низкой температуре 5 °С с применением в качестве инициатора окислительно-восстановительных систем. Среди технологических этапов производства синтетического каучука, оказывающих прямое влияние на молекулярные характеристики продукта, можно выделить подготовку реагентов и последующую полимеризацию при заданной температуре в каскаде реакторов до достижения заданной конверсии мономеров.

Для инициирования процесса используется гидроперекись пинана, объем которой эмпирически определяется под достижение конечной конверсии продукта. Для регулирования молекулярной массы применяется трет-додецилмеркаптан. В рамках существующего производства возможна как двух-, так и трехточечная подача регулятора. В непрерывном производстве задействовано до 12 реакторов объемом до 10,8 м<sup>3</sup>, а технология промышленного производства предполагает ввод регулятора в 1, 3 и 6-й по ходу батареи полимеризаторы (рис. 1). Соотношение бутадиена со стиролом в мономерной фазе по массовым частям составляет 70:30 и обеспечивает при достижении заданной конверсии характерные свойства продукта по составу.



Р и с. 1. Схема непрерывного процесса сополимеризации бутадиена со стиролом  
F i g. 1. Scheme of the continuous process of copolymerization of butadiene with styrene

*Примечание:* ВЦО – водно-щелочная отмывка.

*Note:* ВЦО – water-alkaline cleaning.

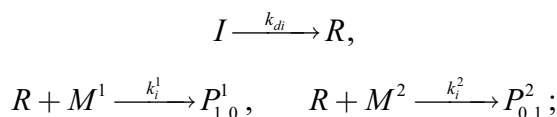
*Источник:* здесь и далее в статье все рисунки составлены автором.

*Source:* hereinafter in this article all figures are drawn up by the author.

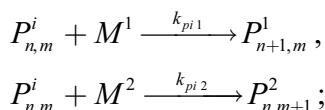
<sup>8</sup> Папков В. Н., Ривин Э. М., Блинов Е. В. Бутадиен-стирольные каучуки. Синтез и свойства : моногр. Воронеж, 2015. 315 с.

С учетом представленной технологии производства при математическом описании процесса сополимеризации обязательному учету подлежат следующие стадии кинетического механизма:

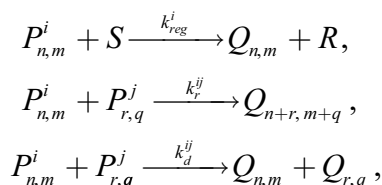
1) инициирование активных центров:



2) рост цепи с участием двух типов молекул мономера:



3) обрыв цепи в результате ее передачи на регулятор, а также механизмов рекомбинации и диспропорционирования:



где  $I$  – инициатор;  $R$  – свободный радикал;  $M^1, M^2$  – мономеры 1-го и 2-го типов;  $S$  – регулятор;  $P_{n,m}^i$  – активные цепи сополимера длиной  $n + m$ , состоящие из  $n$  звеньев мономера  $M^1$  и  $m$  звеньев мономера  $M^2$  и оканчивающиеся мономером  $M^i$ ;  $Q_{n,m}$  – неактивные цепи сополимера длиной  $n + m$ ; параметры  $i, j = 1, 2$  характеризуют тип мономера на конце растущей цепи;  $k_{di}, k_i, k_p, k_{reg}, k_r, k_d$  – константы, характеризующие скорости элементарных реакций.

В приведенном кинетическом механизме  $I$  представляет собой соединение, которое при распаде образует активные частицы (радикалы  $R$ ), запускающие цепную реакцию полимеризации мономеров бутадиена и стирола ( $M^1$  и  $M^2$ ) с целью образования высокомолекулярных соединений (сополимеров). В случае если цепи сополимера содержат реакционноспособные центры (свободные радикалы), то они могут участвовать в дальнейших цепных реакциях. Они представлены в механизме как активные цепи  $P$ , в отличие от неактивных цепей  $Q$ . Регулятор  $S$  добавляется в процесс с целью контроля молекулярной массы сополимеров путем принудительного обрыва образуемых макромолекул.

На основании представленной схемы элементарных реакций выписывается система дифференциальных уравнений, характеризующих изменение материального баланса по каждому компоненту. В силу достаточно большой длины образуемых макромолекул  $P_{n,m}^i$  и  $Q_{n,m}$  используется переход к усредненным молекулярным характеристикам с применением статистических моментов молекулярно-массового распределения:

$$\Psi_k^{M^1} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} (nM_a + mM_b)^k P_{n,m}^1,$$

$$\Psi_k^{M^2} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} (nM_a + mM_b)^k P_{n,m}^2,$$

$$\Psi_k^Q = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} (nM_a + mM_b)^k Q_{n,m},$$

где  $M_a, M_b$  – молярная масса мономеров 1-го и 2-го типов. С учетом обозначений

$$C_{M^1} = \sum_{n,m=0}^{\infty} P_{n,m}^1, \quad C_{M^2} = \sum_{n,m=0}^{\infty} P_{n,m}^2 \quad \text{система примет окончательный вид:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = -k_{di}I, \\ \frac{dM^1}{dt} = -k_{p11}M^1C_{M^1} - k_{p21}M^1C_{M^2}, \\ \frac{dM^2}{dt} = -k_{p12}M^2C_{M^1} - k_{p22}M^2C_{M^2}, \\ \frac{dS}{dt} = -k_{reg}^1SC_{M^1} - k_{reg}^2SC_{M^2}, \\ \frac{d\Psi_i^{M^1}}{dt} = G_i^1(k_{di}, k_p, k_r, k_d, k_{reg}, I, S, M^1, M^2, C_{M^1}, C_{M^2}), \\ \frac{d\Psi_i^{M^2}}{dt} = G_i^2(k_{di}, k_p, k_r, k_d, k_{reg}, I, S, M^1, M^2, C_{M^1}, C_{M^2}), \\ \frac{d\Psi_i^Q}{dt} = H_i(k_r, k_d, k_{reg}, S, C_{M^1}, C_{M^2}, \Psi^{M^1}, \Psi^{M^2}), \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $i = 0..2$ , а функции  $G_i$  и  $H_i$  выражают зависимость моментов молекулярно-массового распределения от соответствующих компонентов [23].

С целью учета переноса реакционной массы из одного реактора в другой вводятся рекуррентные соотношения для каждого компонента системы (2), справедливые при описании реакторов идеального перемешивания:

$$\frac{d\bar{Y}^{(k)}}{dt} = \frac{(\bar{Y}^{(k-1)} - \bar{Y}^{(k)})}{\theta^{(k)}} + \bar{R}_y^{(k)},$$

где  $\theta^{(k)}$  – время нахождения реакционной смеси в  $k$ -том реакторе каскада, а вид  $\bar{R}_y^{(k)}$  определяется исходя из кинетического механизма.

Оценку потребительских свойств бутадиен-стирольного сополимера будем проводить по значениям среднечисленной и среднемассовой молекулярных масс, определяемых из соотношений:

$$M_n = \frac{\Psi_1^{M^1} + \Psi_1^{M^2} + \Psi_1^Q}{\Psi_0^{M^1} + \Psi_0^{M^2} + \Psi_0^Q}, \quad M_w = \frac{\Psi_2^{M^1} + \Psi_2^{M^2} + \Psi_2^Q}{\Psi_1^{M^1} + \Psi_1^{M^2} + \Psi_1^Q}.$$

С целью определения режима подачи регулятора критерий оптимизации был сформирован в виде функционала, отражающего абсолютную разницу расчетных и заданных значений среднечисленной  $\overline{M}_n$  и среднемассовой  $\overline{M}_w$  молекулярных масс:

$$G(X^*(0))(t_{end}) = |M_n - \overline{M}_n| + |M_w - \overline{M}_w| \rightarrow \min. \quad (3)$$

**Результаты исследования.** На основании представленного модельного описания процесса требуется определить дозировку и режим многоточечной подачи регулятора, способствующие получению продукта с заданными молекулярными характеристиками  $\overline{M}_n = 60 \cdot 10^3$  г/моль и  $\overline{M}_w = 180 \cdot 10^3$  г/моль при достижении конверсии 75 %.

Согласно условиям организации непрерывного производства добавление регулятора возможно в начале процесса, а также в 3-й и 6-й по ходу батареи полимеризаторы. В таком случае в рамках реализации генетического алгоритма требуется найти вектор из трех значений, определяющих соответствующую концентрацию регулятора, выражаемую в моль/л для каждого реактора  $X^*(0) = (S_1^*(0), S_3^*(0), S_6^*(0))$ . Поскольку критерием оптимизации является получение продукта с заданной молекулярной массой, то в качестве целевой функции используется абсолютная разность между рассчитываемыми и заданными значениями молекулярных характеристик, представленная ранее в виде функционала (3).

Для решения данной задачи описанный выше генетический алгоритм был запрограммирован с использованием языка Python (версия 3.10.12). Размер начальной популяции  $K$  на 1-м этапе реализации алгоритма определялся четырьмя вариантами решений. В соответствии с условиями организации непрерывного производства были рассчитаны молярные концентрации компонентов реакционной массы: бутадиен – 3,578 моль/л; стирол – 0,796 моль/л; инициатор –  $8,43 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Общая концентрация регулятора была задана в интервале ( $2 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$ ) моль/л, при этом не менее 50 % от нее должно поступать с основной реакционной смесью в 1-й реактор каскада. Перераспределение подачи регулятора и смещение основной массы в 3-й или 6-й полимеризаторы способствуют значительному повышению молекулярного веса продукта в начале процесса. В этом случае наполнение векторов  $S_1^1, S_3^1, S_6^1$  определялось в соответствии с выражениями:

$$S_1^1 = (2 \cdot 10^{-3}; 2,33 \cdot 10^{-3}; 2,67 \cdot 10^{-3}; 3 \cdot 10^{-3}),$$

$$S_3^1 = (0; 0,33 \cdot 10^{-3}; 0,67 \cdot 10^{-3}; 10^{-3}),$$

$$S_6^1 = (0; 0,33 \cdot 10^{-3}; 0,67 \cdot 10^{-3}; 10^{-3}).$$

На 1-й итерации выполнения алгоритма на основании наполнения векторов  $S_1^1, S_3^1, S_6^1$  было сформировано четыре возможных решения  $X_i^1$  ( $i = 1 \dots 4$ ):

$$X_1^1 = (2 \cdot 10^{-3}; 0; 0),$$

$$X_2^1 = (2,33 \cdot 10^{-3}; 0,33 \cdot 10^{-3}; 0,33 \cdot 10^{-3}),$$

$$X_3^1 = (2,67 \cdot 10^{-3}; 0,67 \cdot 10^{-3}; 0,67 \cdot 10^{-3}),$$

$$X_4^1 = (3 \cdot 10^{-3}; 10^{-3}; 10^{-3}).$$

Затем для каждого из  $X_i^1$  была проведена оценка степени приспособленности  $G(X_i^1)$  и после их нормализации рассчитаны соответствующие вероятности  $p(X_i^1)$  выбора каждой такой особи для формирования потомков:

$$G(X_1^1) = 391 \cdot 10^3, \quad p(X_1^1) = 0,1,$$

$$G(X_2^1) = 21,5 \cdot 10^3, \quad p(X_2^1) = 0,32,$$

$$G(X_3^1) = 61 \cdot 10^3, \quad p(X_3^1) = 0,3,$$

$$G(X_4^1) = 10^5, \quad p(X_4^1) = 0,28.$$

Для формирования родительского пула значения  $p(X_i^1)$  были последовательно расположены на отрезке от 0 до 1 с образованием интервалов –  $[0; 0,1]$ ,  $(0,1; 0,42]$ ,  $(0,42; 0,72]$  и  $(0,72; 1]$ . Последующая генерация четырех случайных чисел  $r_i$  определяла выбор соответствующих  $X_i^1$ . Поскольку в ходе вычислительных испытаний произошло двукратное попадание  $r_i$  во 2-й интервал, а также однократное в 3-й и 4-й интервалы, то было принято, что в результате стохастического отбора был сформирован родительский пул, в который вошли решения  $(X_2^1; X_2^1; X_3^1; X_4^1)$ . Далее из родительского пула образование потомков проводилось с использованием арифметического оператора кроссинговера:

$$X_{1,i}^2 = aX_{2,i}^1 + (1-a)X_{2,i}^1,$$

$$X_{2,i}^2 = aX_{2,i}^1 + (1-a)X_{3,i}^1,$$

$$X_{3,i}^2 = aX_{2,i}^1 + (1-a)X_{4,i}^1,$$

$$X_{4,i}^2 = aX_{3,i}^1 + (1-a)X_{4,i}^1,$$

где  $i = 1 \dots 3$ . В случае использования равномерного оператора кроссинговера значение  $a = 0,5$ , а потомки принимают значения:



$$X_1^2 = (2,33 \cdot 10^{-3}; 0,33 \cdot 10^{-3}; 0,33 \cdot 10^{-3}),$$

$$X_2^2 = (2,5 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}),$$

$$X_3^2 = (2,67 \cdot 10^{-3}; 0,67 \cdot 10^{-3}; 0,67 \cdot 10^{-3}),$$

$$X_4^2 = (2,83 \cdot 10^{-3}; 0,83 \cdot 10^{-3}; 0,83 \cdot 10^{-3}).$$

Для очередного поколения проводится возможная процедура мутации, определяющая случайное изменение найденных элементов, и оценка степени приспособленности.

Поскольку целью решения задачи является нахождение вектора  $X^*(0) = (S_1^*(0), S_3^*(0), S_6^*(0))$ , позволяющего получить минимальное значение целевой функции вида (3), то стандартным условием прерывания алгоритма является достижение предельного количества итераций или выполнение условия допустимой точности:

$$G(X^*(0))(t_{end}) < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – точность решения задачи, равная  $10^3$  для заданных условий решения задачи.

Остановка генетического алгоритма может производиться также на основании зафиксированного критически малого изменения значения функции приспособленности в течение нескольких итераций, свидетельствующего о том, что наилучшее решение достигнуто.

В результате серии проведенных вычислительных испытаний было обнаружено, что задача имеет ряд решений, каждое из которых способствует получению продукта с заданными молекулярными характеристиками. В таблице представлена случайная выборка из 10 полученных в ходе запуска программы решений задачи.

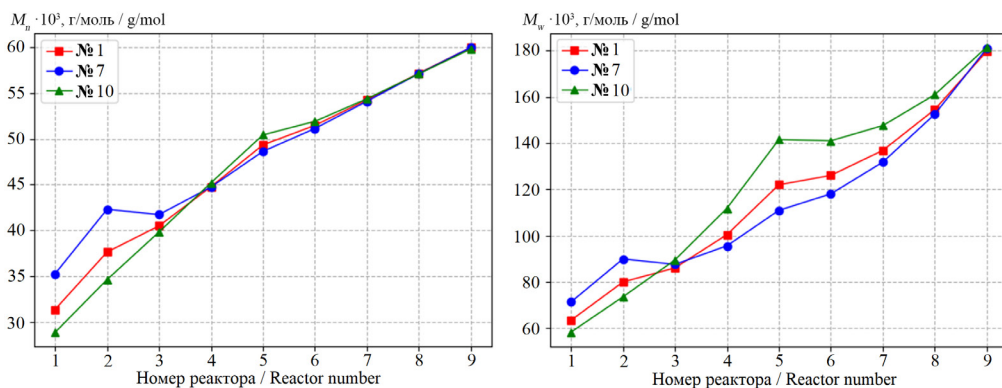
Т а б л и ц а  
T a b l e

Результаты вычислений  
Calculation results

Выборка решений задачи / Selection of the solutions for the problem	Дозировка регулятора по реакторам каскада, % / Dosage of the regulator across the cascade reactors, %			Суммарная концентрация регулятора, $10^{-3}$ моль/л / Total concentration of the regulator, $10^{-3}$ mol/l	Количество итераций / Number of iterations
	1 реактор / 1 reactor	3 реактор / 3 reactor	6 реактор / 6 reactor		
1*	78,41	12,71	8,88	3,364	93
2	76,95	14,10	8,95	3,343	16
3	78,15	12,96	8,89	3,339	24
4	74,93	17,91	7,16	3,362	56
5	73,30	19,33	7,37	3,348	41
6	75,06	16,97	7,96	3,328	37
7*	69,79	24,16	6,06	3,359	41
8	80,41	10,20	9,39	3,397	39
9	83,10	6,38	10,52	3,406	73
10*	84,87	2,68	12,45	3,380	134

Анализ полученных результатов показывает, что в большинстве проведенных вычислительных испытаний решение достигается менее чем за 100 итераций, а необходимая суммарная концентрация регулятора находится в диапазоне  $[3,3 \cdot 10^{-3}; 3,4 \cdot 10^{-3}]$  моль/л. В случаях, когда дозировку регулятора в 1-й реактор каскада рекомендуется задать в интервале 70–75 %, подача регулятора в 6-й реактор предлагается минимальной. Увеличение дозировки подачи регулятора в 1-й реактор каскада до 80–85 % способствует перераспределению остальной концентрации и необходимости увеличения дозировки в 6-й реактор каскада.

На рисунке 2 представлены зависимости среднечисленной и среднемассовой молекулярных масс, полученные для трех наиболее различающихся режимов подачи регулятора (№ 1, № 7 и № 10). Анализ рисунков показывает, что предложенные варианты решений, представленные в таблице, во всех случаях позволяют получить заданные молекулярные характеристики на выходе из последнего реактора при достижении конверсии 75 %. Динамика молекулярных характеристик в течение всего процесса полимеризации для всех трех случаев носит различный характер.



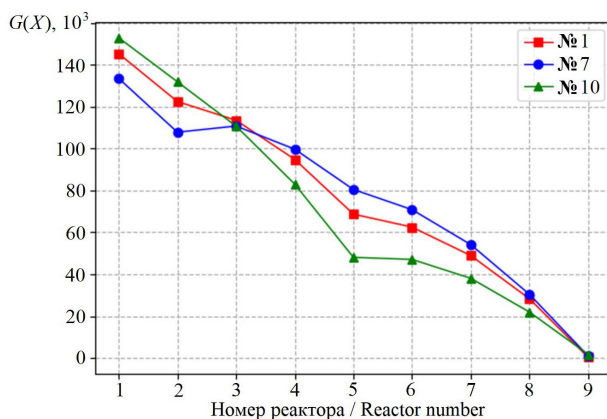
Р и с. 2. Зависимость среднечисленной  $M_n$  и среднемассовой  $M_w$  молекулярных масс от номера полимеризатора для трех различных режимов подачи регулятора (№ 1, № 7 и № 10)

F i g. 2. Dependence of the average-number and average-mass molecular weight on the polymerizer number for three different regulator supply modes (№ 1, № 7 and № 10)

В частности, кривая, построенная по условиям решения № 10, демонстрирует низкий темп роста молекулярной массы в 1-х реакторах каскада в связи с достаточно большим объемом регулятора, заложенным в начале процесса. Стремительный расход регулятора и достаточно малый остаточный объем, подаваемый в 3-й реактор каскада, способствуют опережающему темпу роста молекулярной массы в сравнении с другими кривыми. Очередная подача регулятора в 6-й реактор каскада позволяет значительно снизить темпы роста  $M_n$ ,  $M_w$  и способствовать достижению заданных значений.

Также была построена зависимость соответствующего критерия оптимизации, представленного ранее в виде функционала (3), для трех различных режимов подачи регулятора (рис. 3). Визуальный анализ полученных кривых позволяет

отметить, что скорость убывания критерия оптимизации различается в зависимости от используемого режима подачи регулятора (№ 1, № 7 или № 10), однако в конечной точке способствует достижению заданного критерия эффективности.



Р и с. 3. Зависимость критерия оптимизации  $G(X)$  от номера полимеризатора для трех различных режимов подачи регулятора (№ 1, № 7 и № 10)

F i g. 3. Dependence of the optimization criterion on the polymerizer number for three different regulator supply modes (№ 1, № 7 and № 10)

**Обсуждение и заключение.** Таким образом, разработаны метод и алгоритм решения задачи поиска оптимального режима многоточечной подачи регулятора, способствующей получению продукта с заданной молекулярной массой. В основе метода решения и его программной реализации лежит генетический алгоритм, относящийся к классу эвристических методов оптимизации и основанный на механизме создания популяции потенциальных решений с использованием вероятностных законов. Генетический алгоритм при исследовании и оптимизации сложных многофакторных физико-химических систем является предпочтительным, поскольку способствует нахождению глобального оптимума благодаря случайному характеру при поиске решений и возможности поддерживать их разнообразие в популяции.

Применение генетического алгоритма для поиска оптимального режима подачи регулятора при получении бутадиен-стирольного сополимера позволяет эффективно искать глобальные оптимумы в сложном многомерном пространстве параметров, в отличие от классических методов оптимизации, ориентированных на поиск локальных решений. Классические численные методы, реализованные во многих библиотеках и программных продуктах, часто требуют определения направления движения к оптимуму в каждой точке. Особые сложности возникают в условиях отсутствия аналитического представления оптимизируемой функции, например, в рамках реализации имитационного подхода к моделированию. Кроме того, генетический алгоритм позволяет осуществлять поиск одного или нескольких параметров системы в дискретном множестве переменных, характерном для задач поиска технологических параметров промышленного производства.



К сожалению, реализация генетического алгоритма в условиях идентификации большого количества параметров системы гораздо менее эффективна по времени ведения расчетов. Возможность интеграции технологий распараллеливания позволяет минимизировать эти потери за счет распределения задач между несколькими процессорами или вычислительными узлами. Кроме того, при решении многофакторных задач оптимизации требуется тщательная настройка параметров алгоритма, определяющая необходимость постоянного эмпирического анализа с целью оптимального использования данного метода.

В частности, с использованием разработанного метода и алгоритма была решена задача идентификации режима трехточечного регулирования молекулярной массы для непрерывного процесса получения бутадиен-стирольного сополимера. Программная реализация данного алгоритма и проведенные вычислительные испытания позволили оценить различные режимы трехточечного регулирования молекулярной массы с применением трет-додецилмеркаптана и получить серию решений задачи оптимизации, визуализация которых демонстрирует различную динамику молекулярной массы в течение всего процесса. Очевидно, что в соответствующих условиях организации промышленного производства разнообразие решений дает возможность управления процессом синтеза полимеров в случае постоянного мониторинга физико-химических характеристик продукта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ регулирования процесса эмульсионной сополимеризации : патент 1466516 Российская Федерация / Грачев Г. М. [и др.]. № 4069311/05 ; заявл. 26.05.1986 ; опубл. 15.12.1994. URL: <https://clck.ru/3DzamK> (дата обращения: 15.05.2024).
2. Моделирование динамических режимов процессов синтеза полимеров на основе метода моментов для мультимодальных распределений / С. Л. Подвальный [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80, № 9. С. 1261–1262. EDN: [WLNMBF](https://www.edn.ru/WLNMBF)
3. Янборисов В. М., Козлов В. Г. Моделирование полимеризации изопрена в присутствии каталитической системы  $TiCl_4$ - $BuCl$  методом Монте-Карло // Вестник Башкирского университета. 2021. Т. 26, № 1. С. 52–57. EDN: [EWISKP](https://www.edn.ru/EWISKP)
4. Modified Concept of Bond Blocks and its Applications / K. A. Tereshchenko [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 433. Part 2. Article no. 133537. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133537>
5. Thakur A. K., Gupta S. K., Chaudhari P. Slurry-Phase Ethylene Polymerization Processes: a Review on Multiscale Modeling and Simulations // Reviews in Chemical Engineering. 2022. Vol. 38, No. 5. P. 539–568. <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0048>
6. Kinetic Modeling of the Synthesis of Poly(4-vinylpyridine) Macro-Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer Agents for the Preparation of Block Copolymers / F. Kandelhard [et al.] // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2023. Vol. 62, Issue 22. P. 8696–8708. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00607>
7. Furuya T., Koga T. Molecular Simulation of Polymer Gels Synthesized by Free Radical Copolymerization: Effects of Concentrations and Reaction Rates on Structure and Mechanical Properties // Polymer. 2023. Vol. 279. Article no. 126012. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126012>
8. Kandelhard F., Georgopoulos P. A Kinetic and Heat Balance Model for Anionic Batch Block Copolymerization of Styrene and Isoprene // Chemie Ingenieur Technik. 2023. Vol. 95, Issue 5. P. 754–760. <https://doi.org/10.1002/cite.202200205>

9. Model-Assisted Optimization of RAFT Polymerization in Micro-Scale Reactors – A Fast Screening Approach / F. Kandelhard [et al.] // *Macromolecular Reaction Engineering*. 2021. Vol. 15, Issue 4. Article no. 2000058. <https://doi.org/10.1002/mren.202000058>
10. Kinetic Approach to Modeling the Radical Polymerization of Butyl Acrylate in the Presence Dibenzyl Trithiocarbonate / N. V. Ulitin [et al.] // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 6. P. 761–768. <https://doi.org/10.1134/S1990793112060218>
11. Study of Kinetics of Isoprene Polymerization in the Presence of Neodymium-Containing Catalytic Systems Modified in Turbulent Flows / E. N. Miftakhov [et al.] // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021. Vol. 94. P. 77–83. <https://doi.org/10.1134/S1070427221010110>
12. Mavrantzas V. G. Using Monte Carlo to Simulate Complex Polymer Systems: Recent Progress and Outlook // *Frontiers in Physics*. 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.661367>
13. Monte Carlo Simulation of Surface-Initiated Polymerization: Heterogeneous Reaction Environment / B. Yang [et al.] // *Macromolecules*. 2022. Vol. 55, Issue 6. P. 1970–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02575>
14. Application of the Monte Carlo Method in Modeling the Isoprene Polymerization Process in the Presence of the Polycentric Titanium-Containing Catalytic System / S. Mustafina [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Article no. 012127. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012127>
15. Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A Review on Genetic Algorithm: Past, Present, and Future // *Multimedia Tools and Applications*. 2021. Vol. 80. P. 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
16. Kasat R. B., Ray A. K., Gupta S. K. Applications of Genetic Algorithm in Polymer Science and Engineering // *Materials and Manufacturing Processes*. 2003. Vol. 18, Issue 3. P. 523–532. <https://doi.org/10.1081/AMP-120022026>
17. Polymer Design Using Genetic Algorithm and Machine Learning / C. Kim [et al.] // *Computational Materials Science*. 2021. Vol. 186. Article no. 110067. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.110067>
18. Xu D., Xu H. Application of Genetic Algorithm in Model Music Composition Innovation // *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2023. Vol. 9, Issue 1. <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.00070>
19. A Multifactorial Cellular Genetic Algorithm for Multimodal Multitask Optimization / E. Osaba [et al.] // *Conference: 2022 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2022. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/CEC55065.2022.9870324>
20. Latent Crossover for Data-Driven Multifidelity Topology Design / T. Kii [et al.] // *Journal of Mechanical Design*. 2024. Vol. 146, Issue 5. <https://doi.org/10.1115/1.4064979>
21. Aladdin A. M., Rashid T. A New Lagrangian Problem Crossover – A Systematic Review and Meta-Analysis of Crossover Standards // *Systems*. 2023. Vol. 11, Issue 3. <https://doi.org/10.3390/systems11030144>
22. Pretorius K., Pillay N. Neural Network Crossover in Genetic Algorithms Using Genetic Programming // *Genetic Programming and Evolvable Machines*. 2024. Vol. 25. Article no. 7. <https://doi.org/10.1007/s10710-024-09481-7>
23. Алгоритм оценки молекулярных характеристик полимерного продукта в условиях многоточечного регулирования / Э. Н. Мифтахов [и др.] // *Инженерные технологии и системы*. 2023. Т. 33, № 2. С. 270–287. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.270-287>

## REFERENCES

1. Grachev G.M., Klement'ev V.A., Kudryavtsev L.D., Molodyka A.V., Papkov V.N., Polumestnyi V.N., [et al.]. [Method for Regulating the Emulsion Copolymerization Process]. Patent 1466516 Russian Federation. 1994 December 15. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3DzamK> (accessed 15.05.2024).
2. Podvalny S.L., Belyanin A.M., Tikhomirov S.G., Khvostov A.A. [Modeling of Dynamic Modes of Polymer Synthesis Processes Based on the Method of Moments for Multimodal Distributions]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2016;80(9):1261–1262. (In Russ.) EDN: WLNMBF



3. Ianborisov V.M., Kozlov V.G. Monte-Carlo Modeling of Isoprene Polymerization in the Presence of the  $\text{TiCl}_4$ - $\text{BuCl}$  Catalytic System. *Bulletin of the Bashkir University*. 2021;26(1):52–57. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EWISKP
4. Tereshchenko K.A., Shiyani D.A., Ulitin N.V., Kolesov S.V. Deberdeev R.Y., Kharlampidi K.E. Modified Concept of Bond Blocks and its Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2021;433(2):133537. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133537>
5. Thakur A.K., Gupta S.K., Chaudhari P. Slurry-Phase Ethylene Polymerization Processes: a Review on Multiscale Modeling and Simulations. *Reviews in Chemical Engineering*. 2022;38(5):539–568. <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0048>
6. Kandelhard F., Pashayev E., Schymura J., Georgopoulos P. Kinetic Modeling of the Synthesis of Poly(4-vinylpyridine) Macro-Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer Agents for the Preparation of Block Copolymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023;62(22):8696–8708. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00607>
7. Furuya T., Koga T. Molecular Simulation of Polymer Gels Synthesized by Free Radical Copolymerization: Effects of Concentrations and Reaction Rates on Structure and Mechanical Properties. *Polymer*. 2023;279:126012. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126012>
8. Kandelhard F., Georgopoulos P. A Kinetic and Heat Balance Model for Anionic Batch Block Copolymerization of Styrene and Isoprene. *Chemie Ingenieur Technik*. 2023;95(5):754–760. <https://doi.org/10.1002/cite.202200205>
9. Kandelhard F., Schuldt K., Schymura J., Georgopoulos P., Abetz V. Model-Assisted Optimization of RAFT Polymerization in Micro-Scale Reactors – A Fast Screening Approach. *Macromolecular Reaction Engineering*. 2021;15(4):2000058. <https://doi.org/10.1002/mren.202000058>
10. Ulitin N.V., Nasyrov I.I., Deberdeev T.R., Berlin A.A. Kinetic Approach to Modeling the Radical Polymerization of Butyl Acrylate in the Presence of Dibenzyl Trithiocarbonate. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2012;6:761–768. <https://doi.org/10.1134/S1990793112060218>
11. Miftakhov E.N., Nasyrov I.Sh., Mustafina S.A., Zakharov V.P. Study of Kinetics of Isoprene Polymerization in the Presence of Neodymium-Containing Catalytic Systems Modified in Turbulent Flows. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021;94:77–83. <https://doi.org/10.1134/S1070427221010110>
12. Mavrantzas V.G. Using Monte Carlo to Simulate Complex Polymer Systems: Recent Progress and Outlook. *Frontiers in Physics*. 2021;9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.661367>
13. Yang B., Liu S., Ma J., Yang Y., Li J., Jiang B.-P., [et al.]. Monte Carlo Simulation of Surface-Initiated Polymerization: Heterogeneous Reaction Environment. *Macromolecules*. 2022;55(6):1970–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02575>
14. Mustafina S., Mikhailova T., Miftakhov E., Podvalnyi E. Application of the Monte Carlo Method in Modeling the Isoprene Polymerization Process in the Presence of the Polycyclic Titanium-Containing Catalytic System. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021:012127. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012127>
15. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A Review on Genetic Algorithm: Past, Present, and Future. *Multimedia Tools and Applications*. 2021;80:8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
16. Kasat R.B., Ray A.K., Gupta S.K. Applications of Genetic Algorithm in Polymer Science and Engineering. *Materials and Manufacturing Processes*. 2003;18(3):523–532. <https://doi.org/10.1081/AMP-120022026>
17. Kim C., Batra R., Chen L., Tran H., Ramprasad R. Polymer Design Using Genetic Algorithm and Machine Learning. *Computational Materials Science*. 2021;186:110067. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.110067>
18. Xu D., Xu H. Application of Genetic Algorithm in Model Music Composition Innovation. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2023;9(1). <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.00070>
19. Osaba E., Del Ser J., Martinez A.D., Lobo J.L. A Multifactorial Cellular Genetic Algorithm for Multimodal Multitask Optimization. *Conference: 2022 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2022:1–8. <https://doi.org/10.1109/CEC55065.2022.9870324>
20. Kii T., Yaji K., Fujita K., Sha Z., Seepersad C.C. Latent Crossover for Data-Driven Multifidelity Topology Design. *Journal of Mechanical Design*. 2024;146(5). <https://doi.org/10.1115/1.4064979>

21. Aladdin A.M., Rashid T.A. A New Lagrangian Problem Crossover – A Systematic Review and Meta-Analysis of Crossover Standards. *Systems*. 2023;11(3). <https://doi.org/10.3390/systems11030144>
22. Pretorius K., Pillay N. Neural Network Crossover in Genetic Algorithms Using Genetic Programming. *Genetic Programming and Evolvable Machines*. 2024;25:7. <https://doi.org/10.1007/s10710-024-09481-7>
23. Miftakhov E.N., Mustafina S.A., Nasyrov I.Sh., Morozkin N.D. Algorithm for Evaluation of the Molecular Characteristics of a Polymer Product Under Conditions of Multipoint Control. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):270–287. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.270-287>

*Об авторе:*

**Мифтахов Эльдар Наилевич**, доктор физико-математических наук, научный сотрудник Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-5949>, Researcher ID: AAA-5885-2019, Scopus ID: 56178153800, SPIN-код: 6314-8818, [promif@mail.ru](mailto:promif@mail.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 18.08.2024; поступила после рецензирования 02.09.2024;  
принята к публикации 09.09.2024*

*About the author:*

**Eldar N. Miftakhov**, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Research Officer, Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-5949>, Researcher ID: AAA-5885-2019, Scopus ID: 56178153800, SPIN-code: 6314-8818, [promif@mail.ru](mailto:promif@mail.ru)

*Author have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 18.08.2024; revised 02.09.2024; accepted 09.09.2024*

# ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.615-628>

EDN: <https://elibrary.ru/ocjlyv>

УДК 66.063.8:637.146.3:637.138

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

*Оригинальная статья / Original article*




## Исследование влияния режима гомогенизации на энергетические затраты и сроки хранения йогурта с добавлением пюре кизила

Ю. Б. Гербер , Т. В. Калиновская,

А. В. Гаврилов, Н. С. Киян

*Агротехнологическая академия Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского*

*(г. Симферополь, Российская Федерация)*

 [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

### **Аннотация**

**Введение.** Одним из наиболее значимых факторов, обеспечивающих успешную реализацию технологии производства различных молочных продуктов, является гомогенизация. При проведении указанного процесса изменяются основные составляющие сырья – структура и свойства белков. В том числе уменьшается размер мицелл казеина, которые распадаются на субмицеллы. После чего вероятно их скопление на поверхности жировых частиц. Повышение давления гомогенизации усиливает механическое воздействие на частицы, поэтому снижается средний размер жировых шариков.

**Цель исследования.** Разработать способ сокращения энергетических затрат на производство молочных продуктов при обеспечении условий максимального сохранения качеств продукта.

**Материалы и методы.** Проведено изучение влияния давления гомогенизации на технические показатели процесса, а именно мощность, затрачиваемую на привод гомогенизатора, а также на динамику изменения свойств продукта при хранении. Рассмотрены аналитические зависимости, описывающие основные параметры гомогенизации.

**Результаты исследования.** Соблюдение рекомендуемых параметров гомогенизации, а также других параметров, в частности тепловой обработки, позволяет значительно увеличить продолжительность хранения продукта без существенного изменения первоначальных качественных показателей. Если условия процесса позволяют измельчить первоначальные жировые частицы до размера около 1,0 мкм, затем равномерно распределить их по всему объему, то можно получить существенное улучшение вкуса, а также консистенции получаемой продукции. Изучено влияние параметров гомогенизации на срок хранения йогурта предложенной нами рецептуры изготовления с использованием южных плодов, в частности кизила.

**Обсуждение и заключение.** Учитывая полученные результаты, можно утверждать, что на величину затрат энергии существенно влияет величина давления

© Гербер Ю. Б., Калиновская Т. В., Гаврилов А. В., Киян Н. С., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



гомогенизации (абсолютная величина), а также соотношение величин давления на разных ступенях гомогенизации. Продукт, полученный по предложенному рецепту с добавлением измельченного кизила, сохраняет хорошие вкусовые и микробиологические свойства, а также физико-химические показатели в пределах нормативных параметров на протяжении двух недель (14–15 сут). Из этого следует, что предельный срок хранения такого йогурта составляет не более 15-ти суток при температуре не более +6 °С.

**Ключевые слова:** тепловая обработка, жировые шарики, гомогенизация, энергетические затраты, дробление, сроки хранения

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование влияния режима гомогенизации на энергетические затраты и сроки хранения йогурта с добавлением пюре кизила / Ю. Б. Гербер [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 615–628. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.615-628>

## Investigation of the Effect of the Homogenization Regime on Energy Costs and Shelf Life of Yogurt with Dogberry Puree

Y. B. Gerber✉, T. V. Kalinovskaya, A. V. Gavrillov, N. S. Kiyan  
*Agrotechnology Academy V.I. Vernadsky Crimean Federal University  
(Simferopol, Russian Federation)*

✉ [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Homogenization is one of the most significant factors ensuring the successful implementation of the technology for manufacturing various dairy products. During this process, there are changed the properties and structure of proteins. In particular, there is decreased the size of casein micelles, which break down into submicelles. After that, the accumulation of submicells on the surface of fat particles is likely. The increase in the homogenization pressure amplifies the mechanical effect on the particles, therefore, the average size of fat globules decreases.

**Aim of the Study.** The study is aimed at reducing energy costs for manufacturing dairy products while ensuring the maximum preservation of the quality of dairy products.

**Materials and Methods.** There has been studied the influence of homogenization pressure on the process technical parameters such as the power used for the homogenizer drive and for the dynamics of changes in the product properties during storage. The analytical dependences describing the main parameters of homogenization are considered.

**Results.** Compliance with the recommended homogenization parameters and other parameters, in particular heat treatment, can significantly increase the product shelf life without significant changes in the initial quality indicators. If the process conditions allow crushing the initial fat particles to a size of about 1.0 micrometer and distributing them evenly throughout the volume, it makes possible to get a significant improvement in the taste and consistency of the resulting products. There has been studied influence of homogenization parameters on the shelf life of yogurt manufactured according to the proposed formula with using southern fruits, in particular, with dogberries.

**Discussion and Conclusion.** Taking into account the results of experimental studies, we have concluded that the energy costs are significantly affected by the homogenization pressure (absolute value) and the ratio of pressure values at various stages of homogenization. The product manufactured according to the proposed formula with crushed dogberries preserves good taste, microbiological properties, and physical and chemical specified parameters for 14–15 days. It follows that the shelf life of yogurt manufactured according to the proposed formula should not exceed more than fourteen days at a temperature of no more than +6 °С.



**Keywords:** heat treatment, fat globules, homogenization, energy costs, crushing, dispersion

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Gerber Y.B., Kalinovskaya T.V., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Investigation of the Effect of the Homogenization Regime on Energy Costs and Shelf Life of Yogurt with the Dogberry Puree. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):615–628. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.615-628>

**Введение.** Механические воздействия на молочное сырье играют значительную роль в формировании потребительских свойств конечного молочного продукта. Так, величина давления гомогенизации оказывает значимое воздействие на качественные показатели конечных молочных продуктов, например, йогурта, сметаны [1–3]. Необходимо также отметить, что такие механические воздействия на молочное сырье, как сепарирование (очистка), перемешивание, перекачивание, воздействие бифидогенезом, существенно влияют на стабильное состояние жировой фазы и степень ее дисперсности. Наиболее подвержена влиянию из всех физических и химических свойств – вязкость, величина которой повышается после прохождения рабочей зоны гомогенизатора [4–6]. Гомогенизация вызывает изменение свойств и структуры белка. Из-за распада мицелл на субмицеллы и, как следствие, снижения размеров происходит их осаждение на жировых шариках. Повышение давления и усиление воздействия на продукт вызывают нарастание дисперсности жира. Средний диаметр жировых частиц снижается.

Целью данной работы является обоснование комплексных технических, технологических параметров гомогенизации, обеспечивающих снижение затрат мощности на привод при обеспечении максимальной сохранности качественных показателей.

**Обзор литературы.** По данным Всесоюзного научно-исследовательского и конструкторского института молочной промышленности, при давлении около 15 МПа размер жировых частиц молока находится в пределах 1,42–1,44 мкм, а эффективность гомогенизации составляет 72–75 %. Повышение давления до 20 МПа ведет к снижению среднего диаметра жировых частиц до 0,95–0,98 мкм, а эффективность гомогенизации при этом достигает 78–80 % [7–9]. Рекомендуемая авторами величина давления гомогенизации находится в пределах 10–20 МПа. Выбор конкретного значения зависит от вида готового продукта, его состава, характеристик [10–12]. В то же время гомогенизация требует высоких энергетических затрат на реализацию процесса [13–15]. Повышение содержания жира в молоке, а также сухих веществ, представляет возможным снижением рабочего давления до нижнего уровня указанного диапазона. Гомогенизатор производительностью 4–5 т/ч потребляет более 25 кВт·ч электроэнергии. Поэтому особенно важно подходить дифференцированно к выбору режима работы для каждого конкретного случая [16–18]. Например, при гомогенизации сливок процесс образования новых жировых оболочек идет гораздо медленнее, чем в молоке. Образование новой поверхности жировых оболочек в оптимальных условиях для сливок проходит при отношении сухого обезжиренного молочного остатка к жиру выше 0,80–0,85 [19–21].

**Материалы и методы.** Проведено изучение влияния давления гомогенизации на технические показатели процесса. Задача исследований – сокращение энергетических затрат на производство молочных продуктов при обеспечении условий максимального сохранения качества продукта.

Скорость потока, проходящего через рабочий орган гомогенизатора:

$$V = \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}},$$

где  $\Delta p = p_2 - p_1$  – разность значений давления продукта до клапанной щели и после нее, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – объемная масса жидкости, в данном случае молока, кг/м<sup>3</sup>.

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

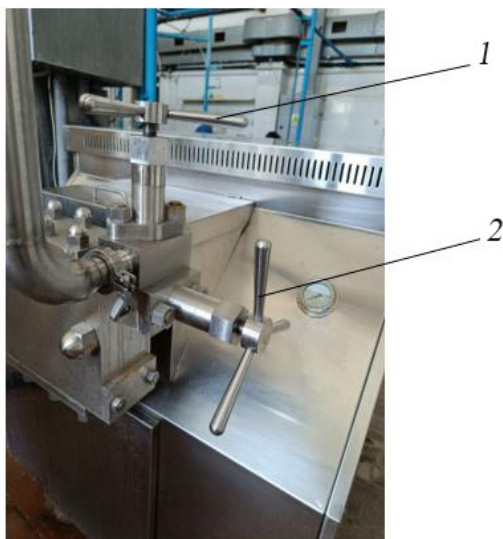
где  $\rho$  – плотность молока, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость прохождения молока через рабочую зону клапана гомогенизатора достигает 200 м/с. Для повышенной надежности работы в современной практике применяют гомогенизатор с двухступенчатым рабочим органом, обеспечивающим более надежную работу, меньшие затраты на обслуживание и лучшие качественные показатели процесса. На каждой ступени представляется возможным регулировка давления, как и при проведении экспериментов на лабораторно-промышленной гомогенизационной установке (рис. 1, 2). Общее давление гомогенизации складывается из суммы двух значений [1; 4]. Преимущество двухступенчатой гомогенизации заключается в том, что вследствие возможности снижения абсолютной величины давления предотвращается образование налипания дробленых жировых частиц на выходе из клапанной щели. На второй ступени продолжается дробление частиц жира, недостаточно измельченных на первой ступени. Таким образом, двухстадийный процесс проходит в более мягких условиях, разность давлений существенно снижается, повышается надежность работы в целом.

Согласно результатам исследований [1; 4] общее давление в случае двухступенчатой гомогенизации складывается из давлений на первой и второй ступенях. Наилучший результат, по мнению авторов, получен при соотношении давления второй ступени к давлению первой ступени около 0,20. Численное соотношение значений  $P_1$  и  $P_2$  при производстве сгущенного молока рекомендовано авторами в следующих пределах: на первой ступени – 11,80...12,50 МПа; второй ступени – 2,8...3,0 МПа. Для сравнения, в случае использования одноступенчатого гомогенизатора, давление составляет 12,0...15,0 МПа.

Для проведения эксперимента использовалось молоко коровье жирностью 2,5 %, температурой 55 °С.

Для технологий производства молочных продуктов с низким содержанием жира, например, йогуртов, такие исследования ранее не проводились. В связи с этим для определения влияния величины отношения давлений гомогенизации на второй и первой ступенях  $\varepsilon = P_2/P_1$  на суммарные энергетические затраты при производстве указанного выше молочного продукта проведен эксперимент на гомогенизаторе МПГ 3000 (рис. 1, 2).



Р и с. 1. Гомогенизатор. Узел регулировки давления:  
1 – винт второй ступени; 2 – винт первой ступени

F i g. 1. The homogenizer. Pressure control unit:  
1 – second stage screw; 2 – first stage screw

*Источник:* фотография сделана при проведении исследований процесса гомогенизации в учебно-технологической лаборатории по переработке молока Института «Агротехнологическая академия» Н. С. Киян (17.05.2024).

*Source:* the photo was taken by N. S. Kiyani while conducting the study of the homogenization process in the educational and technological laboratory for milk processing of the Institute “Agrotechnological Academy” (May 17, 2024).



Р и с. 2. Гомогенизатор. Рабочая зона, манометр контроля давления

F i g. 2. The homogenizer. Working area, pressure monitoring gauge

*Источник:* фотография сделана при проведении исследований работы гомогенизатора в учебно-технологической лаборатории по переработке молока Института «Агротехнологическая академия» А. В. Гавриловым (17.05.2024).

*Source:* the photo was taken by A. V Gavrillov while conducting the study of the homogenizer work in the educational and technological laboratory for milk processing of the Institute “Agrotechnological Academy” (May 17, 2024).

Конструкция агрегата предусматривает регулировку как первой, так и второй ступени гомогенизации с помощью штатных винтовых устройств.

Для изучения зависимостей были отобраны четыре пробы молока при различном давлении гомогенизации: 12, 14, 16, 18 МПа.

Мощность, требуемую на привод гомогенизатора, рассчитывали по формуле:

$$N = \frac{Q}{\eta} P_r,$$

где  $Q$  – производительность, кг/с;  $P_r$  – давление жидкости (молока) до гомогенизирующего клапана, Па;  $\eta$  – механический КПД привода гомогенизатора.

В ходе проведения эксперимента величина давления изменялась в диапазоне от 12 до 18 МПа. Мощность двигателя определяли по потребляемому им току. Измерение силы тока проводили токоизмерительными клещами Fluke 302+, которые имеют погрешность измерения до 1,5 %; погрешность измерения переменного тока – 1,8 %. Шкалу выбора режимов и пределов измерений устанавливали на переменное напряжение с пределом в 750 В. Клемму красного цвета присоединяли к гнезду напряжения, сопротивления и силы тока до 10 А, а черного цвета – к гнезду, обозначенному COM. Замеры выполняли между клеммами U1–V1, V1–W1 или U1–W1.

Затем подавали напряжение на двигатель, который работал в режиме номинальной нагрузки заданный период времени. Установили предел измерений на значение 200 А и токовыми клещами выполнили измерение потребляемого тока на одной из фаз. Далее замеряли напряжение на обмотках с помощью клемм, входящих в комплект измерительного прибора.

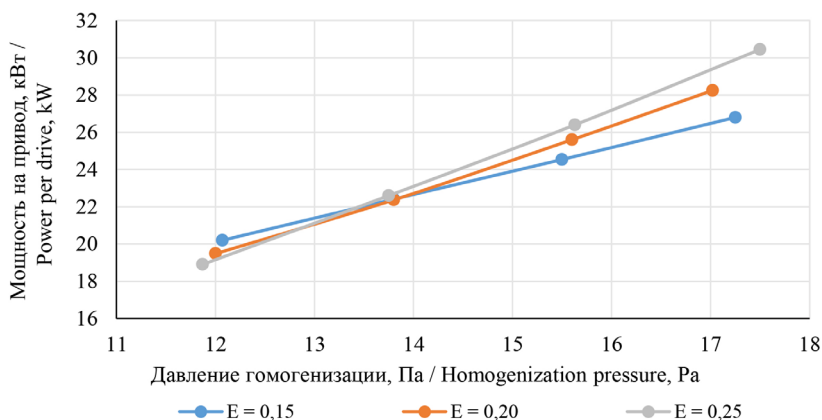
Расчет мощности электродвигателя выполнялся по формуле:

$$N_{\text{дв}} = 1,73 \cdot I \cdot U,$$

где  $N_{\text{дв}}$  – полная мощность, кВт;  $I$  – сила тока, А;  $U$  – значение линейного напряжения, кВт.

**Результаты исследования.** При соотношении давлений  $\varepsilon = 0,2$  получили результаты замеров. Зависимость мощности на привод гомогенизатора  $N$ , кВт от создаваемого давления  $P$ , МПа:  $P = 12$  МПа, то  $N = 19,48$  кВт;  $P = 14$  МПа, то  $N = 22,73$  кВт;  $P = 16$  МПа, то  $N = 25,98$  кВт;  $P = 18$  МПа, то  $N = 29,22$  кВт.

После этого устанавливали различное соотношение давлений  $\varepsilon$ : 0,15; 0,20; 0,25. Увеличивая общее значение давления гомогенизации, замеряли потребляемую мощность по вышеуказанной методике. Сравнительные графики зависимости мощности от величины давления для различных значений  $\varepsilon$  приведены на рисунке 3. Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что изменение соотношения давлений на двух ступенях  $\varepsilon$  с 0,15 до 0,25 повышает мощность на привод гомогенизатора на 11,5...13,5 %, что существенно отражается на суммарных энергетических затратах и указывает на необходимость воспользоваться этим технологическим параметром для оптимизации процесса.



Р и с. 3. Зависимость мощности на привод гомогенизатора  $N$  от давления  $P$   
 F i g. 3. Dependence of the drive power of the homogenizer  $N$  on the pressure  $P$

*Источник:* здесь и далее графики построены авторами статьи на основании исследований процесса гомогенизации.

*Source:* hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors based on studies of the homogenization process.

В сочетании с тепловой обработкой гомогенизация позволяет увеличить срок хранения йогурта без изменения качества, так как в результате этого процесса достигается раздробление жировых шариков примерно в 10 раз (размер 1,0 мкм) и равномерное распределение их по всему объему, что способствует улучшению качества, а именно консистенции и вкуса. Изучение влияния параметров гомогенизации на срок хранения йогурта предложенной нами рецептуры изготовления также было задачей проведенных исследований.

Для определения длительности хранения продукта были проведены исследования микробиологических показателей качества полученных образцов йогурта, обогащенного пюре из кизила и пробиотическими микроорганизмами в процессе хранения.

Определен химический состав пюре из кизила. Установлено, что содержание фенольных веществ составляет 983 мг %, из них антоцианов – 160 мг %, водорастворимого пектина – 3,0 %, клетчатки – 3,1 % к массовой доле сухих веществ пюре. Определено, что пюре из кизила содержит аскорбиновую кислоту в количестве 122,2 мг %. Выяснено, что низкая карбоксильная и ацетильная составляющие и высокая метоксильная составляющая пектина кизила обуславливают высокую студнеобразующую способность пектиновых веществ.

Определив химический состав кизила, выделим следующие функционально-технологические свойства компонентов пюре из кизила: аскорбиновая кислота является консервантом, фенольные вещества обогащают продукт, антоцианы являются природными красящими веществами.

На этапе экспериментальных исследований влияния вкусового наполнителя на качество йогурта, обогащенного пюре из кизила обыкновенного, было изучено влияние дозы внесения наполнителя на органолептические показатели исследуемых

образцов, а также изучено влияние вкусового наполнителя на формирование качественных показателей (активная и титруемая кислотность, условная вязкость и степень синерезиса) йогурта. В результате экспериментальных исследований пришли к выводу, что наиболее целесообразной дозой внесения наполнителя пюре из кизила в количестве 20 % к массе йогурта.

Произведенные образцы йогурта хранили при температуре  $4 \pm 2$  °С в течение 14 суток, органолептические показатели (табл. 1) и активную кислотность (рис. 4) определяли через каждые сутки.

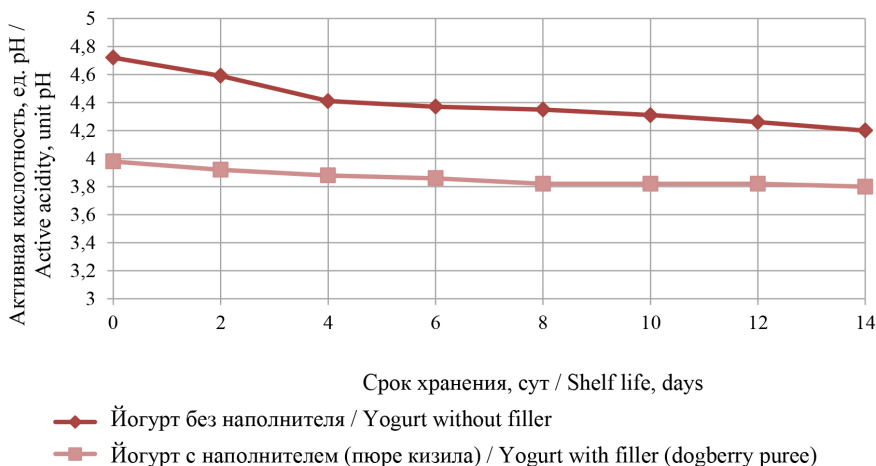
Т а б л и ц а 1

Table 1

**Изменение органолептических показателей йогурта в процессе хранения**  
**Changes in the organoleptic parameters of yogurt during storage**

Наименование показателя / The name of the indicator	Продолжительность хранения, сут / Storage duration, days	Значение показателя / The value of the indicator	
		Йогурт без наполнителя / Yogurt without filler	Йогурт с наполнителем (пюре кизила) / Yogurt with filling (dogberry puree)
Вкус и запах / Taste and smell	0 ... 7	Чистый кисломолочный, с ярко выраженным ароматом, присущим данному виду продукта / Pure fermented milk, with a pronounced aroma inherent in this type of product	Кисломолочный вкус и аромат, в меру ощутимый аромат кизилового наполнителя и едва заметный сладковатый привкус / Sour-milk taste and aroma, moderately noticeable aroma of dogberry filler and a barely noticeable sweet taste
	7 ... 14	Несколько кисловатый вкус, едва ощутимый дрожжевой аромат / Slightly sour taste, barely noticeable yeast flavor	Кисломолочный вкус и аромат, в меру ощутимый аромат кизилового наполнителя / Sour-milk taste and aroma, moderately noticeable aroma of dogberry filler
Консистенция и внешний вид / Consistency and appearance	0 ... 7	Однородная, плотный сгусток / Homogeneous, dense clot	Однородная, плотная, с наличием ягодного наполнителя по всей массе йогурта / Homogeneous, dense, with the presence of berry filling throughout the yogurt mass
	7 ... 14	Незначительное отделение сыворотки на поверхности продукта / Slight separation of serum on the surface of the product	Однородная, плотная, с наличием ягодного наполнителя по всей массе йогурта / Homogeneous, dense, with the presence of berry filling throughout the yogurt mass
Цвет / Colour	0 ... 14	Молочный оттенок / Milky shade	Красивый розовый цвет с вкраплениями наполнителя / Beautiful pink color with inclusions of filler

В процессе хранения йогурта до 14 суток активная кислотность нарастала (рис. 4), что обусловлено активным развитием лактобактерий. На 14-е сутки хранения кислотность йогурта без наполнителя достигает значения 4,2 ед. рН, йогурта с наполнителем – 3,8 ед. рН, что соответствует значению 140 °Т. По ГОСТ 31981-2013 «Йогурты. Общие технические условия» кислотность йогурта не должна превышать 140 °Т.



Р и с. 4. Изменение активной кислотности йогурта при хранении  
 F i g. 4. The change in the active acidity of yogurt during storage

В течение 14 суток хранения органолептические показатели йогурта с наполнителем существенно не ухудшились, в образце йогурта без наполнителя на 7-е сутки появился кисловатый вкус (рис. 4), на поверхности продукта начала отделяться сыворотка.

Согласно требованиям ТР ТС 033/2013 нормируются допустимые уровни содержания микроорганизмов при выпуске готовой продукции. По микробиологическим показателям разработанный обогащенный йогурт удовлетворяет гигиеническим требованиям (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Микробиологические показатели йогурта, обогащенного пюре из кизила**  
**Microbiological indicators of yogurt enriched with dogberry puree**

Наименование показателя / Indicator name	Требования ТР ТС 033/2013 / Requirements TR TS 033/2013	Фактически / Actually
Количество молочнокислых бактерий (Lactobacillus Bulgaricus и Streptococcus Thermophilus), КОЕ/см <sup>3</sup> (г) / Number of lactic acid bacteria (Lactobacillus Bulgaricus and Streptococcus Thermophilus), CFU/cm <sup>3</sup> (g)	Молочнокислых микроорганизмов не менее 1 · 10 <sup>7</sup> / Lactic acid microorganisms no less 1 · 10 <sup>7</sup>	9,4 · 10 <sup>8</sup>
<i>Масса продукта, в которой не допускаются микроорганизмы, г</i> <i>Weight of product in which microorganisms are not allowed, g</i>		
БГКП (колиформы) / Coliforms (coliforms)	0,01	не обнаружено / not found
Дрожжи, КОЕ/см <sup>3</sup> (г), не более / Yeast, CFU/cm <sup>3</sup> (g), no more	50	не обнаружено / not found
Плесени, КОЕ/см <sup>3</sup> (г), не более / Mold, CFU/cm <sup>3</sup> (g), no more	50	не обнаружено / not found



Микробиологические исследования показали, что количество молочнокислых бактерий (*Lactobacillus Bulgaricus*, *Streptococcus Thermophilus*) в обогащенном йогурте не менее  $9,4 \cdot 10^8$  КОЕ в  $1 \text{ см}^3$  продукта. Таким образом, йогурт, обогащенный пюре из кизила, является пробиотически обогащенным, а потому полезным для питания.

**Обсуждение и заключение.** Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

– повышение давления с 12,0 до 17,5 МПа при обработке молока на гомогенизаторе МППГ 3000 вызывает увеличение мощности на 53,8 %, что указывает на необходимость более точного обоснования давления с целью оптимизации энергетических затрат для конкретной технологической линии переработки молока;

– изменение соотношения  $\epsilon$  с 0,15 до 0,25 повышает мощность на привод гомогенизатора на 11,5...13,5 %;

– общие рекомендации по выбору оптимального режима гомогенизации с целью минимальных энергетических затрат содержат значения общего давления, а также соотношения давлений на первой и второй ступенях;

– рекомендации для каждого конкретного вида молочного продукта могут быть получены только после соответствующих исследований.

Учитывая приведенные результаты экспериментальных исследований, можно утверждать, что в течение 14 суток йогурт имеет высокие органолептические, пробиотические свойства, нормированные физико-химические и микробиологические показатели, поэтому предельный срок хранения йогурта при температуре  $4 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  не должен превышать 14 суток.

Таким образом, в результате проведенных исследований была усовершенствована технология изготовления йогурта, достигнуто улучшение его качества (технологических свойств), что обусловлено оптимизацией давления гомогенизации при обработке молока-сырья и определением факторов, влияющих на качество конечных продуктов предложенной рецептуры на молочной основе. Контроль качества продукта осуществляется путем прослеживания по каждой операции технологического процесса.

В результате изучения технологического процесса производства и показателей качества йогурта проведен анализ гомогенизации молока и сквашивания продукта. Установлено, что рекомендованным давлением гомогенизации для производства кисломолочных продуктов является обработка молока при 14 МПа.

Повышение пищевой и биологической ценности продукции достигнуто использованием консорциума заквасочных культур: термофильных молочнокислых (*Streptococcus Thermophilus*) и пробиотических, а также применением наполнителя из пюре кизила, что придало продукту функциональные свойства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В. Обоснование параметров механической обработки молока при производстве кисломолочных продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49, № 3. С. 375–382. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-375-382>



2. Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Киян Н. С. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 2. С. 200–218. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>
3. Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Сироткина Э. М. Сравнительная оценка существующих технологий производства кефира // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2016. № 8 (171). С. 83–88. EDN: **YMXHUX**
4. Keogh M. K., O’Kennedy B. T. Rheology of Stirred Yogurt as Affected by Added Milk Fat, Protein and Hydrocolloids // Journal of Food Science. 1998. Vol. 63, Issue 1. P. 108–112. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1998.TB15687.X>
5. Зенина Д. В. Влияние гомогенизации на степень использования составных частей молока при производстве творога // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т. 1, № 1. С. 193–198. EDN: **LBRNXE**
6. Автоматизация обработки микрофотографий молочных продуктов с использованием ImageJ и Statistica / В. К. Битюков [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 4. С. 58–63. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2014-4-58-63>
7. Хвостов А. А., Ребриков Д. И., Мерзликін В. Е. Идентификация массовых распределений жировой фазы в молоке с помощью универсальных распределений Пирсона // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2. С. 66–71. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-2-66-71>
8. Стохастическая модель процесса гомогенизации молока с использованием цепи Маркова / А. А. Хвостов [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 1. С. 39–44. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-1-39-44>
9. Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Вербицкий А. П. Исследование предварительного подогрева теплоносителя комплексным энергозамещающим устройством в тепловых процессах переработки молока // Техника и технология пищевых производств. 2018. Т. 48, № 3. С. 124–132. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-124-132>
10. Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Коломытова В. А. Исследование зависимости качества кислотомолочных продуктов от параметров процесса пастеризации на примере кефира // Збірник наукових праць ПФ НУБіП України «Кримський агротехнологічний університет» (технічні науки). 2011. № 135. С. 3–11. <https://elck.ru/3E5mzp>
11. Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В. К вопросу проектирования современного молокоперерабатывающего предприятия // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2018. № 15 (178). С. 97–106. EDN: **YTEJFJ**
12. Банникова А. В. Новые технологические решения по созданию йогуртов с пищевыми волокнами // Техника и технология пищевых производств. 2014. № 3 (34). С. 5–10. EDN: **SNMHHH**
13. Долматова О. И., Красноженова А. В. Изучение реологических свойств кефирного продукта // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 3. С. 73–77. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-73-77>
14. Кригер О. В., Носкова С. Ю. Разработка приемов длительного сохранения свойств молочнокислых микроорганизмов // Техника и технология пищевых производств. 2018. Т. 48, № 4. С. 30–38. EDN: **YWOFHV**
15. Determination of Basic Parameters of Solar Panels / К. Тепе [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 2 (82). С. 22–27. EDN: **MJBGTH**
16. Clapp J., Newell P., Brent Z. W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems // The Journal of Peasant Studies. 2018. Vol. 45, Issue 1. P. 80–88. <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
17. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: A Conceptual Framework // International Journal of Production Economics. 2018. Vol. 195. P. 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>

18. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus – Opportunities for Water Resources Research / X. Cai [et al.] // *Advances in Water Resources*. 2018. Vol. 111. P. 259–273. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
19. Prosekov A. Y., Ivanova S. A. Food Security: The Challenge of the Present // *Geoforum*. 2018. Vol. 91. P. 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>
20. Sabarez H. T. Thermal Drying of Foods // *Fruit Preservation. Novel and Conventional Technologies*. 2018. P. 181–210. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7)
21. Kumar C., Karim M. A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>

## REFERENCES

1. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V. Machine Processing of Milk in Dairy Production. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(3):375–382. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-375-382>
2. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Modeling the Process of Heat Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(2):200–218. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>
3. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Sirotkina E.M. Comparative Evaluation of Existing Production Technologies Kefir. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2016;8(171):83–88. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YMXHUX
4. Keogh M.K., O’Kennedy B.T. Rheology of Stirred Yogurt as Affected by Added Milk Fat, Protein and Hydrocolloids. *Journal of Food Science*. 1998;63(1):108–112. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1998.TB15687.X>
5. Zenina D.V. The Effect of Homogenization on Milk Components Usage in Quark Production. *Aktual’nye Voprosy Molochnoi Promyshlennosti, Mezhotraslevye Tekhnologii i Sistemy Upravleniya Kachestvom*. 2020;1(1):193–198. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LBRNXX
6. Bitiukov V.K., Khvostov A.A., Rebrikov D.I., Merzlikin V.E. Automated Processing of Dairy Product Microphotos Using ImageJ and Statistica. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014;4:58–63. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2014-4-58-63>
7. Khvostov A.A., Rebrikov D.I., Merzlikin V.E. Identification of the Mass Distributions of the Milk Fat Phase Using Universal Pearson Distributions. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015;2:66–71. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-2-66-71>
8. Khvostov A.A., Sumina R. S., Kotov G. I., Ivanov A.V. Stochastic Model of Milk Homogenization Process Using Markov’s Chain. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2016;1:39–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-1-39-44>
9. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Verbitsky A.P. Thermal Treatment in Milk Processing: Using a Complex Energy-Substitution Equipment during Preliminary Water Heating. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2018;48(3):124–132. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-124-132>
10. Gerber Y.B., Gavrilov A.V., Kolomytova V.A. Investigation of the Dependence of the Quality of Fermented Milk Products on the Parameters of the Pasteurization Process on the Example of Kefir. *Collection of Scientific Papers PF NUBiP of Ukraine “Krimsky Agrotechnological University”*. 2011;135:3–11. (In Russ., abstract in Eng.) <https://clck.ru/3E5mzp>
11. Gerber Y.B., Gavrilov A.V. The Question of Designing Modern Milk Processing Plants. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2018;15(178):97–106. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YTEJFJ



12. Bannikova A.V. New Solutions for Creation of Yogurts Containing Dietary Fibers. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2014;3(34):5–10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SNMH4H](#)
13. Dolmatova O.I., Krasnozhenova A.V. Study of the Rheological Properties of a Kefir Product. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021;83(3):73–77. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-73-77>
14. Kriger O.V., Noskova S.Yu. Properties of Lactic Acid Microorganisms: Long-Term Preservation Methods. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2018;48(4):30–38. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [YWOFHV](#)
15. Tepe K., Agbenotowossi K., Djeteli G., Ouro-Djobo S., Napo K., Pichon L. Determination of Basic Parameters of Solar Panels. *Alternative Energy and Ecology*. 2010;2(82):22–27. EDN: [MJBGTH](#)
16. Clapp J., Newell P., Brent Z.W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018;45(1):80–88. <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
17. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: A Conceptual Framework. *International Journal of Production Economics*. 2018;195:419–431. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
18. Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus – Opportunities for Water Resources Research. *Advances in Water Resources*. 2018;111:259–273. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
19. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food Security: The Challenge of the Present. *Geoforum*. 2018;91:73–77. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>
20. Sabarez H.T. Thermal Drying of Foods. *Fruit Preservation. Novel and Conventional Technologies*. 2018:181–210. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7)
21. Kumar C., Karim M.A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019;59(3):379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>

*Об авторах:*

**Гербер Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, п. Аграрное, ул. Научная, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: [B-6690-2019](#), [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

**Калиновская Татьяна Витальевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, п. Аграрное, ул. Научная, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4421-7522>, [kalinovskaya\\_88@mail.ru](mailto:kalinovskaya_88@mail.ru)

**Гаврилов Александр Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, п. Аграрное, ул. Научная, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: [ААН-5137-2019](#), SPIN-код: 9848-4398, [tehfac@mail.ru](mailto:tehfac@mail.ru)

**Киян Наталья Сергеевна**, лаборант кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, п. Аграрное, ул. Научная, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8962>, Researcher ID: [ААН-5147-2019](#), [natashik\\_1993@mail.ru](mailto:natashik_1993@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Ю. Б. Гербер – общая идея, обоснование цели и задач проведения эксперимента, проведение исследований.

Т. В. Калиновская – проведение исследований.

А. В. Гаврилов – техническое обеспечение проведения экспериментов.

Н. С. Киян – проведение исследований.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 05.08.2024; поступила после рецензирования 19.08.2024;  
принята к публикации 26.08.2024*

*About the authors:*

**Yuriy B. Gerber**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (1a Nauchnaya St., Agrarian, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber\_1961@mail.ru

**Tatiana V. Kalinovskaya**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, Agrotechnology Academy V.I. Vernadsky Crimean Federal University (1a Nauchnaya St., Agrarian, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-8052-2014>, kalinovskaya\_88@mail.ru

**Alexander V. Gavrilov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, Agrotechnology Academy V.I. Vernadsky Crimean Federal University (1a Nauchnaya St., Agrarian, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: AAH-5137-2019, SPIN-code: 9848-4398, tehfac@mail.ru

**Natalya S. Kiyana**, Laboratory Assistant of the Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, Agrotechnology Academy V.I. Vernadsky Crimean Federal University (1a Nauchnaya St., Agrarian, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8962>, Researcher ID: AAH-5147-2019, natashik\_1993@mail.ru

*Authors contribution:*

Y. B. Gerber – general idea, justification of the purpose and objectives of the study, conducting the study.

T. V. Kalinovskaya – conducting research.

A. V. Gavrilov – technical support for conducting experiments.

N. S. Kiyana – conducting the study.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 05.08.2024; revised 19.08.2024; accepted 26.08.2024*

# ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.629-647>

EDN: <https://elibrary.ru/ppejxg>

УДК 669.24-044.952:530.145.6

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



## Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC

С. Ю. Жачкин<sup>1</sup>, Г. И. Трифонов<sup>1</sup>✉,  
О. А. Сидоркин<sup>1</sup>, А. В. Пустоветов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
Военно-воздушной академии имени профессора  
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина  
(г. Воронеж, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Воронежский государственный аграрный университет  
имени императора Петра I  
(г. Воронеж, Российская Федерация)

✉ [grishakip@yandex.ru](mailto:grishakip@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Электролитическое осаждение наночастиц вызывает все больше интереса с увеличением их востребованности в сфере восстановления поверхностных слоев деталей машин и механизмов. Для создания композиционных покрытий необходимо решить две основные задачи: обеспечить достаточное количество частиц в покрытии и предотвратить их агломерацию в растворах для нанесения. При этом полученные покрытия с содержанием наночастиц являются износостойкими и применяются, например, в создании автомобильных и тракторных двигателей. В данном исследовании изучается процесс электролитического получения композиционных покрытий на основе никелевой матрицы с микронными и субмикронными частицами карбида кремния (SiC) из растворов никеля Уоттса, а также изучается сопротивление износу скольжения композиционных покрытий никеля.

**Цель исследования.** Провести детальное исследование влияния размера и количества частиц, находящихся в растворе для покрытия, на количество кодепонированных частиц. Изучить, как размер частиц влияет на процесс кодепонирования частиц неброуновского типа.

**Материалы и методы.** Для нанесения композиционных покрытий на основе никеля с добавлением SiC использовался обычный электролит для никелирования. У каждого раствора, используемого для нанесения покрытия, была измерена численная плотность частиц. Предполагалось, что частицы имеют одинаковый размер и форму сферы. Концентрация частиц в растворах для нанесения покрытия варьировалась от 0,28 до 104 г/л. Электроосаждение проводилось на вертикальных электродах, а раствор для нанесения покрытия перемешивался магнитной мешалкой. Были измерены микротвердость по Виккерсу с нагрузкой 30 г и проведены испытания на износ при однонаправленном и двунаправленном скольжении.

© Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Сидоркин О. А., Пустоветов А. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

*Результаты исследования.* Получены результаты исследования сопротивления износу композиционных покрытий никеля при скольжении. Представлены результаты кодепонирования и модель, основанная на плотности кодепонированных частиц. Дано заключение о влиянии кодепонированных частиц на сопротивление износу композиционных покрытий Ni-SiC.

*Обсуждение и заключение.* Определено, что наилучшая износостойкость при скольжении получена в случае использования композиционных покрытий Ni-SiC, содержащих 4–5 объемных процента субмикронных частиц SiC. Исследование показало, что размер и плотность частиц SiC в растворе для покрытия имеют важное значение при получении гальванически износостойких композиционных покрытий, так как основываются на связи между плотностью осажденных частиц и плотностью частиц в растворе.

**Ключевые слова:** электроосаждение, композиционные покрытия, износ, карбид кремния, никель, кодепонированные частицы

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC / С. Ю. Жачкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 629–647. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.629-647>

## Wear Resistance of Nickel Composite Coatings with Micron-Sized and Submicron-Sized Particles of SiC

S. Y. Zhachkin<sup>a</sup>, G. I. Trifonov<sup>a</sup>✉,  
O. A. Sidorkin<sup>a</sup>, A. V. Pustovetov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Military Training and Research Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh, Russian Federation)

<sup>b</sup> Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (Voronezh, Russian Federation)

✉ [grishakip@yandex.ru](mailto:grishakip@yandex.ru)

### Abstract

*Introduction.* Electrolytic deposition of nanoparticles is gaining interest with their increasing demand for restoring surface layers of machine parts and mechanisms. To create composite coatings with nanoparticles, it is necessary to solve two main tasks: to ensure a sufficient number of particles in the coating and to prevent their agglomeration in the coating solutions.

These coatings with nanoparticles are wear-resistant and are used, for example, in automobile and tractor engines. In this study, there are considered the process of electrolytic production of composite coatings based on a nickel matrix with micron-sized and submicron-sized silicon carbide (SiC) particles from Watts nickel solutions and the resistance of nickel composite coatings to sliding wear.

*Aim of the Study.* The study is aimed at considering detailed the effect of the size and number of particles in the coating solution on the number of codeposited particles. It is also necessary to study how the particle size affects the codeposition of micron-sized and submicron-sized particles of the non-Brownian type.

*Materials and Methods.* A conventional nickel-plating electrolyte was used for nickel-based composite coatings with SiC. There was measured particle number density for each coating solution. It was assumed that the particles had the same size and shape of a sphere.



The concentration of particles in the coating solutions ranged from 0.28 to 104 g/l. Electrodeposition was carried out on vertical electrodes, and the coating solution was stirred with a magnetic stirrer during electrodeposition. The Vickers microhardness with a load of 30 g was measured and wear tests were performed for unidirectional and bidirectional sliding.

*Results.* The results of studying the wear resistance of nickel composite coatings during sliding have been obtained. The results of codeposition and a model based on the density of codeposited particles are presented. There has been made the conclusion about effect of codeposited particles on the wear resistance of Ni-SiC composite coatings.

*Discussion and Conclusion.* It was determined that the best sliding resistance was obtained using Ni-SiC composite coatings containing 4–5 volume percentage of submicron-sized SiC particles. The study showed that the size and density of SiC particles in the coating solution are important for producing galvanically wear-resistant composite coatings, based on the relationship between the density of deposited particles and the density of particles in solutions.

**Keywords:** electrodeposition, composite coatings, wear, silicon carbide, nickel, codeposited particles

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V. Wear Resistance of Nickel Composite Coatings with Micron-Sized and Submicron-Sized Particles of SiC. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):629–647. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.629-647>

**Введение.** Электроосажденные композиционные покрытия состоят из металлической или сплавной матрицы, содержащей дисперсные частицы второй фазы<sup>1</sup> [1]. Эти частицы могут быть твердыми оксидными или карбидными, такими как  $Al_2O_3$ , SiC,  $TiO_2$ , WC,  $SiO_2$  или алмаз; твердым смазочным материалом для улучшения сопротивления износу и/или снижения трения [2; 3], таким как графит или  $MoS_2$ . Композиционные покрытия, полученные методом электролиза и содержащие частицы микронного размера, используются как износостойкие покрытия. Например, Ni-SiC используется в производстве автомобильных и тракторных двигателей [4; 5]. С увеличением доступности наночастиц возрастает интерес к их электролитическому осаждению, так как процесс электролиза относится к «холодным» методам нанесения покрытия, не вызывающим термическую деформацию деталей. Основными трудностями при осаждении композиционных покрытий с наночастицами являются получение достаточного количества частиц в покрытии и избегание агрегации частиц, находящихся в растворах для покрытия [6].

В данной работе исследуется электролитическое получение композиционных покрытий на основе никелевой матрицы с микрон и субмикронных частиц карбида кремния (SiC) из растворов никеля Уоттса, рассматривается сопротивление износу скольжения таких композиционных покрытий, как никель.

Исследуется влияние размера частиц и их количества в покрывающем растворе на количество частиц, которые будут депонированы вместе. В статье представлены результаты этого процесса и модель, основанная на плотности частиц.

<sup>1</sup> Упрочнение деталей машин композиционными электроосажденными покрытиями с применением электроэрозивных диспергированных твердых сплавов : моногр. / В. И. Серебровский [и др.]. Курск : Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, 2022. 93 с. EDN: YTTWHA



Рассматривается влияние размера частиц на процесс кодепонирования микрон и субмикронных частиц неброуновского типа. Обсуждается влияние кодепонированных субмикронных частиц на сопротивление износу композиционных покрытий Ni-SiC.

Цель исследования заключается в глубоком анализе влияния размера и количества частиц, присутствующих в покрывающем растворе, на объем закодированных частиц. Также выяснено, как размер частиц влияет на процесс кодирования неброуновских частиц.

**Обзор литературы.** Исходные никель-фосфорные покрытия характеризуются относительно низким уровнем механических свойств и микротвердости, которая составляет от 400 до 500 HV. Однако, согласно проведенным исследованиям [7–9], добавление карбидов, нитридов или оксидов переходных металлов в состав покрытия приводит к повышению его твердости до 800 HV [10–12]. В работах [13–15] объясняется, что данный эффект возникает при добавлении дополнительных присадок в никелевое покрытие, так как частицы закрепляются на границах уже существующих зерен и объемов [16; 17]. Содержание фосфора (до 7 %) в исходном состоянии существенно влияет на пластичность и прочность покрытия. Дальнейшее увеличение концентрации фосфора приводит к незначительным изменениям. Аналогичные результаты были получены в исследовании [18]. В указанных исследованиях за основу было взято добавление 2 г/л фосфористой кислоты, что привело к кратному повышению такого показателя качества покрытия, как твердость. Причем, если брать во внимание количество фосфора непосредственно в электролите, было определено, что при достижении показателя в 10 г/л фосфор никак не влияет на показатель твердости наносимого покрытия [19; 20].

Рассматривая параметры никелевого покрытия без добавок и наполнителей, узнали [21], что его модуль упругости может достигать порядка 210 ГПа. Однако проведенные исследования и результаты научных трудов ведущих ученых в области покрытий и методов их нанесения не дают четкого понимания о влиянии на сплав добавления 3–6 массовых процента фосфора, при этом известно, что 9 массовых процента фосфора в сплаве дают хорошие предпосылки для повышения модуля упругости до 210 ГПа.

Проведя анализ перечня научных работ, выявили, что при использовании карбида кремния в качестве наполнителя в составе наносимого сплава модуль упругости достигает значения до 230 ГПа.

Рассматривая отдельным аспектом карбид титана в работе<sup>2</sup>, обосновали его крайне экстремальный характер в ходе поднятия уровня твердости покрытия. Так, при показателе в 1,5 г/л твердость покрытия может составлять 593 HV. Если содержание присадки увеличивается до 2,0 г/л, то твердость снижается. Эту зависимость авторы объясняют влиянием дисперсионного упрочнения, поскольку происходит образование сегрегаций, что негативно сказывается на качестве формируемого покрытия.

<sup>2</sup> Механические свойства алюмоматричных композитов с добавлением карбида титана / В. Е. Адас [и др.] // Уральская горная школа – регионам : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (4 – 13 апреля 2022 г., г. Екатеринбург). Екатеринбург, 2022. С. 67–68. EDN: QTQNHN

В соответствии с результатами исследователей<sup>3</sup>, ввиду относительно высокой плотности дислокаций и их геометрических показателей, различные фазовые границы более эффективно препятствуют движению дислокаций. Образование кристаллов никеля может вызвать сжатие объема, что приводит к возникновению внутренних напряжений и трещин, влияющих на значения микротвердости. В работе<sup>4</sup> приводится аргумент в пользу того, что введение в покрытие упрочняющей фазы способствует укреплению структуры и созданию препятствий для дислокационного движения. Результаты исследования [22] уточняют эту гипотезу, указывая на наличие тесной взаимосвязи между концентрацией второй фазы, микротвердостью и, как следствие, износостойкостью покрытий.

Однако в открытых источниках нет данных, четко связывающих размер и концентрацию наполнителей второй фазы композитных покрытий с их износостойкостью.

**Материалы и методы.** Для осаждения композиционных покрытий на основе никеля и содержащих SiC использовался стандартный электролит никелирования. Состав электролита приведен в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Электролит для получения композиционных покрытий  
Electrolyte for the production of composite coatings

Компонент / Component	Концентрация, г/л / Concentration, g/l	Назначение компонента / The purpose of the component
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	250	Основная соль, поставщик ионов никеля / Basic salt, supplier of nickel ions
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50	Депассиватор анода / Anode Depassivator
$\text{H}_3\text{BO}_3$	50	Буферная добавка / Buffer additive

Режимы нанесения покрытия были выбраны из условия получения максимальной адгезии его к основе и составили  $\text{pH} \div 3,8$ . Температура электролита – 50 °С. Плотность тока – 2 А/дм<sup>2</sup>. Время осаждения покрытия – 75 мин. Обеспечение седиментационной устойчивости электролита – магнитное перемешивание. Катод – латунь площадью 12 см<sup>2</sup>. Анод – никель площадью 12 см<sup>2</sup>.

Характеристика частиц наполнителя композиционного покрытия на основе никелевой матрицы представлена в таблице 2.

<sup>3</sup> Движения дислокаций при высокой скорости деформации / Д. С. Воронин [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXIX Междунар. симпозиума имени А. Г. Горшкова (15 – 19 мая 2023 г., г. Кременки). М., 2023. С. 77–78. EDN: USVKXZ; Полухин Д. С. Структура и свойства композитного никель-фосфорного покрытия, термообработанного по разным режимам : дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2023. EDN: MZGDWP

<sup>4</sup> Бирюков В. П. Влияние упрочняющей фазы на механические и триботехнические характеристики покрытий, полученных лазерной наплавкой // Трибология – машиностроению : тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения А. П. Семёнова (12 – 14 октября 2022 г., г. Москва). М., 2022. С. 46–49. EDN: LHBFWY

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Характеристика наполнителя никелевой матрицы в электролите**  
**Characteristics of the filler of the nickel matrix in the electrolyte**

Плотность частиц $n_s$ , частиц/м <sup>3</sup> / Particle density $n_s$ , particles/m <sup>3</sup>	Концентрация частиц, г/л / Concentration, g/l	Диаметр частиц, мкм / Particle diameter, $\mu\text{m}$
$5 \cdot 10^{12}$	1,04	5
$10^{13}$	2,10	5
$10^{14}$	20,80	5
$5 \cdot 10^{14}$	104,00	5
$5 \cdot 10^{14}$	0,28	0,7
$10^{15}$	0,57	0,7
$10^{16}$	5,71	0,7
$5 \cdot 10^{16}$	0,56	0,3
$10^{17}$	57,10	0,7
$5 \cdot 10^{17}$	5,62	0,3
$5 \cdot 10^{18}$	56,20	0,3

У каждого из растворов для нанесения покрытия рассчитали численную плотность частиц,  $n_s$  (табл. 2), исходя из предположения, что частицы являются монодисперсными и сферическими. Концентрация частиц в растворах для нанесения покрытия варьировалась от 0,28 до 104 г/л. Каждый раствор для нанесения покрытия перемешивали магнитным перемешиванием в течение 24 ч, а затем ультразвуковым перемешиванием в течение 30 мин непосредственно перед нанесением гальванического покрытия. Электроосаждение осуществлялось на вертикальных электродах, а раствор для нанесения покрытия перемешивали во время электроосаждения магнитной мешалкой.

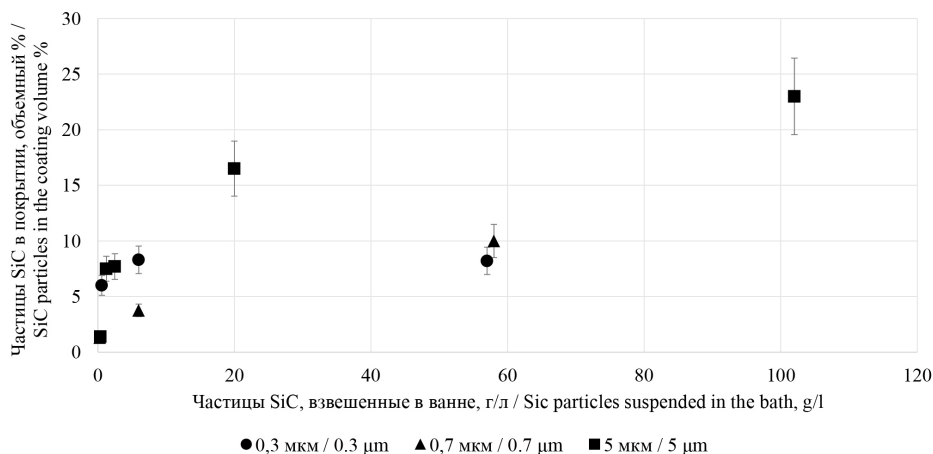
После нанесения покрытия образцы были вырезаны и залиты эпоксидной смолой. Металлографические шлифы для наблюдения были отшлифованы и отполированы без использования наждачной бумаги SiC, чтобы избежать шаржирования.

Количество частиц SiC, включающихся в покрытиях, оценивалось методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на полированных поперечных сечениях.

Измерения микротвердости по Виккерсу (нагрузка 30 г) также проводились на этих полированных поперечных сечениях. Испытания на износ при однонаправленном и двунаправленном скольжении проводились на дисках с покрытием. Испытания на износ при однонаправленном скольжении шариком по диску проводились при нормальной нагрузке 10 Н и скорости скольжения 0,1 м/с. Количество оборотов диска составило 15 000. Испытания на износ с шариковым диском двунаправленного скольжения проводились при нормальной нагрузке 5 Н, частоте колебаний 10 Гц и амплитуде тангенциального смещения 500 мкм. Количество циклов составило 50 000. Все испытания на износ проводились на 10-миллиметровых корундовых шариках без смазки при температуре 22 °С. Коэффициент трения непрерывно регистрировался во время испытаний на износ. Объемные потери материала определялись методом лазерной профилометрии после завершения испытаний на износ.

Далее образцы очищали в этаноле с использованием ультразвукового перемешивания в течение 15 мин. Для сравнения однонаправленных и двунаправленных испытаний износ выражался как объемный коэффициент износа ( $\text{см}^3/\text{Нм}$ ). Этот коэффициент был рассчитан путем деления общей объемной потери износа на общее расстояние скольжения и приложенную нагрузку.

**Результаты исследования.** Количество совместно осажденного SiC показано на рисунке 1 для трех типов частиц SiC. Объемный процент совместно осажденного SiC в покрытиях растет с увеличением концентрации частиц в растворе для покрытия, что согласуется с литературой [23–25].



Р и с. 1. Объемный процент частиц SiC в композиционном гальваническом покрытии на основе никеля в зависимости от различной концентрации и размеров частиц SiC в растворах для нанесения покрытий

F i g. 1. Volume percentage of SiC particles in nickel-based composite electroplating, depending on different concentrations and sizes of SiC particles in coating solutions

*Источник:* здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

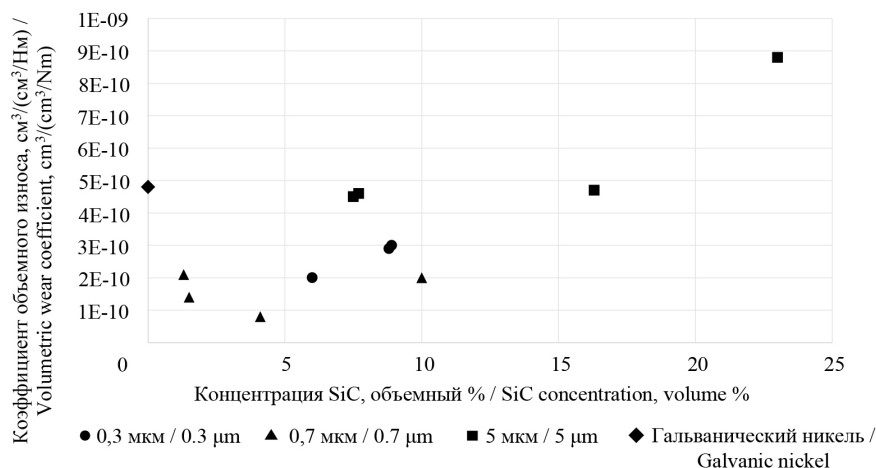
*Source:* hereinafter in this article all figures are compiled by the authors of the article.

Наибольший объемный процент содержания SiC достигается при осаждении крупных частиц размером 5 мм. На ряду с этим авторы<sup>5</sup> [26] считают, что разнородные фазовые границы более эффективно подавляют движение дислокаций за счет большей несовместимости деформаций и плотности геометрически необходимых дислокаций. Таким образом, наименьший объемный процент достигается при использовании частиц размером 0,7 мм. Совершенно неожиданно для частицы SiC размером 0,3 мм объемный процент оказался больше, чем частицы размером 0,7 мм. Причину авторы видят в различном состоянии поверхности этих частиц SiC, полученных от разных производителей. Другой причиной может быть повышенная агломерация частиц размером 0,3 мм в растворе для нанесения покрытия.

<sup>5</sup> Движения дислокаций при высокой скорости деформации / Д. С. Воронин [и др.]; Полухин Д. С. Структура и свойства композитного никель-фосфорного покрытия, термообработанного по разным режимам.

После проведения испытаний на одно- и двунаправленное скольжение композиционные покрытия состава Ni-SiC показывают следы износа черного цвета, которые имеют царапины, параллельные направлению движения. Для всех испытанных композитных покрытий Ni-SiC коэффициент трения составляет приблизительно 0,5 в течение первых нескольких циклов скольжения. После фазы обкатки коэффициент трения никелевых покрытий, содержащих включения 0,7 или 0,3 мкм частиц SiC, составляет приблизительно 0,29. Этот коэффициент трения ниже значения 0,34, наблюдаемого для никелевых покрытий, содержащих частицы SiC диаметром 5 мкм при сопоставимом объемном проценте совместно нанесенных частиц. С другой стороны, для каждого исследованного образца коэффициент трения возрастает с увеличением объемного процента частиц SiC в покрытиях приблизительно от 0,34 до 0,47 (в случае частиц SiC размером 5 мкм) и от 0,28 до 0,30 (в случае частиц размером 0,7 мкм).

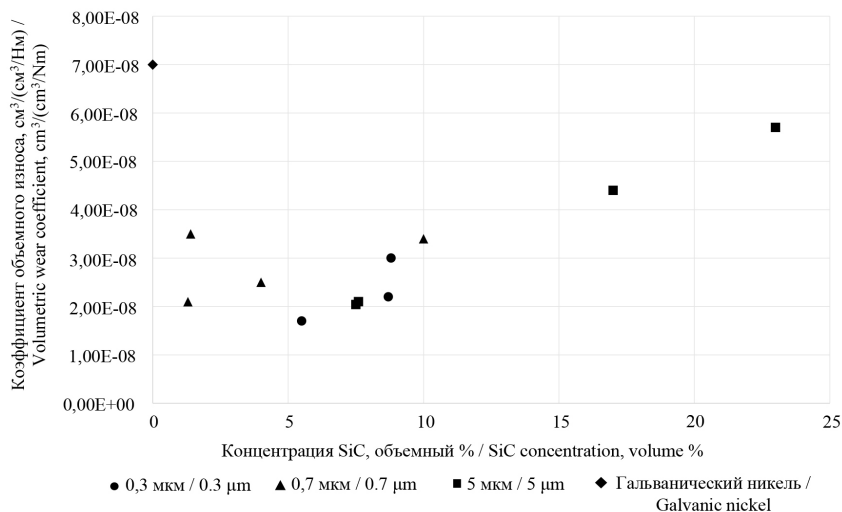
Износ на композитных покрытиях Ni-SiC, содержащих частицы SiC различного размера, после скольжения по корундовым шарикам в одно- и двунаправленных испытаниях на износ показан на рисунках 2 и 3 соответственно. Объемный износ на чистых никелевых покрытиях и композитных покрытиях Ni-SiC в однонаправленных испытаниях на скольжение примерно на два порядка меньше, чем отмеченный в двунаправленных испытаниях на скольжение. Это соответствует данным по износу при скольжении на твердых керамических покрытиях, показывающих более низкую скорость износа при однонаправленных, чем при двунаправленных испытаниях на скольжение. При однонаправленном скольжении композитные никелевые покрытия, содержащие частицы SiC диаметром 5 мкм, обладают более низкой стойкостью к износу с увеличением количества SiC, по сравнению с чистыми никелевыми покрытиями (рис. 2).



Р и с. 2. Коэффициент объемного износа при однонаправленном скольжении по чистому гальваническому никелю и по композиту, имеющему различное объемное содержание частиц SiC трех разных размеров

F i g. 2. Volumetric wear coefficient for unidirectional sliding on pure galvanic nickel and on a composite containing different volumetric content of SiC particles of three different sizes

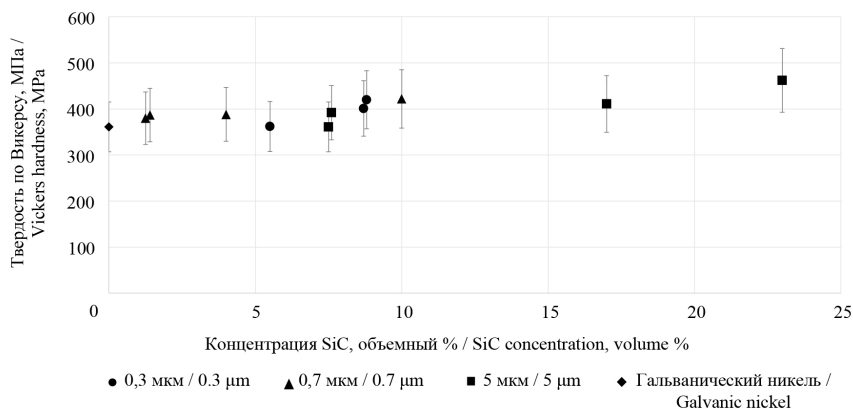
Напротив, композитные никелевые покрытия, содержащие частицы SiC диаметром 0,3 или 0,7 мкм, изнашиваются меньше в однонаправленных испытаниях на скольжение, чем чистый никель. Лучшие результаты достигаются при примерно 4 об. % частиц SiC диаметром 0,7 мкм. При двунаправленном скольжении объемный износ на всех композитных покрытиях Ni-SiC ниже, чем износ, измеренный на чистых никелевых покрытиях, электроосажденных при аналогичных условиях (рис. 3).



Р и с. 3. Объемный износный фактор при двунаправленном скольжении по чистому никелю и композитному покрытию Ni-SiC в зависимости от концентрации и размеров наполнителя  
F i g. 3. Volumetric wear factor in bidirectional sliding on pure nickel and Ni-SiC composite coating depending on the concentration and size of the filler

Наименьший объемный износ при двунаправленном скольжении достигается с композитными никелевыми покрытиями, содержащими примерно 5 об. % частиц SiC диаметром 0,3 мкм. В попытке прояснить износостойкость испытанных композитных покрытий Ni-SiC была измерена твердость Виккерса. Твердость Виккерса построена как функция объемного процента осажденных частиц SiC (рис. 4).

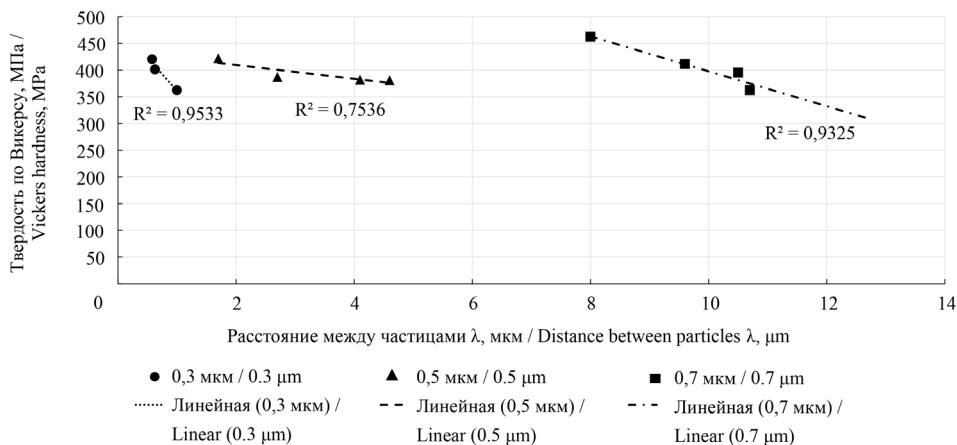
Для трех исследованных размеров частиц SiC твердость Виккерса возрастает с увеличением количества частиц SiC в никелевой матрице. Твердость Виккерса всех исследованных покрытий Ni-SiC выше, чем у чистого электроосажденного никеля. Для достижения высокого значения твердости требуется меньший объемный процент субмикронных частиц SiC, чем в случае с частицами SiC диаметром 5 мкм. Механические свойства металлических композитов, такие как твердость, зависят от количества и размера дисперсной фазы, а также от механических характеристик матрицы. Так, два вида механизмов упрочнения в металлических композитных материалах – дисперсионное упрочнение и упрочнение частицами – определяются количеством и размером частиц. Дисперсионно укрепленный композит отличается наличием мелких частиц, которые имеют диаметр в диапазоне от 0,01 до 1 мкм и составляют от 1 до 15 объемных процентов.



Р и с. 4. Твердость по Виккерсу чистого никеля и композитных покрытий Ni-SiC, содержащих частицы SiC в зависимости от объемного процента совместно нанесенных частиц SiC и их размеров

Fig. 4. Vickers hardness of pure nickel and Ni-SiC composite coatings containing SiC particles depending on the volume percentage of co-deposited SiC particles and their sizes

Наивысшая производительность процесса осаждения была обнаружена при расстоянии между частицами ( $\lambda$ ) от 0,5 до 5 мкм. В этом случае матрица несет нагрузку, а мелкие частицы затрудняют движение дислокаций. Композит, укрепленный частицами, содержит более 20 объемных процентов частиц размером более 1 мкм. При расстоянии между частицами больше 5 мкм нагрузка несетя как матрицей, так и частицами. Упрочнение достигается за счет того, что частицы ограничивают деформацию матрицы. Какой из этих механизмов активен в композитных покрытиях Ni-SiC в данной работе, становится очевидным при построении зависимости твердости Виккерса этих покрытий от расстояния между частицами (рис. 5).

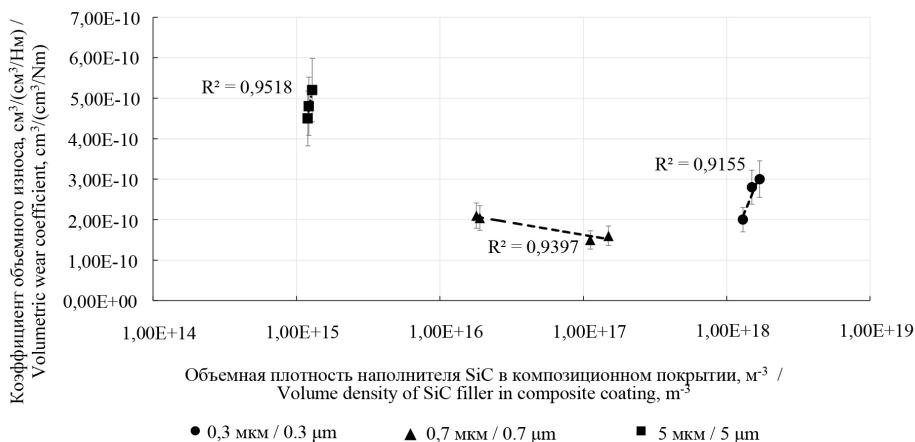


Р и с. 5. Зависимость твердости по Виккерсу композитных покрытий с частицами Ni-SiC в соответствии с размером частиц и расстоянием между ними в покрытии

Fig. 5. Vickers hardness dependence of composite coatings with Ni-SiC particles, depending on the particle size and the distance between them in the coating

Это расстояние было рассчитано с учетом того, что частицы SiC монодисперсны, сферически и равномерно распределены в покрытиях. В никелевых покрытиях, содержащих частицы SiC диаметром 5 мкм, расстояние между ними больше 5 мкм даже при наивысшем объемном проценте частиц (7,5–23 объемных процента) (рис. 4). Увеличение твердости, отмеченное в этих композиционных покрытиях, содержащих микронные частицы SiC, может быть связано с эффектом упрочнения частицами. Напротив, в композитных никелевых покрытиях, содержащих 2–10 объемных процента субмикронных частиц SiC, расстояние между частицами меньше 5 мкм.

Таким образом, увеличение твердости в этих композитных покрытиях можно связать с эффектом упрочнения дисперсной фазы. Это указывает на важность достижения равномерного распределения неагломерированных субмикронных частиц для получения эффекта упрочнения. Расстояние между частицами дисперсной фазы как параметр, который зависит не только от объемного процента осажденных частиц, но и от их размера, более подходит для анализа механических свойств и, следовательно, износа, чем представление, основанное исключительно на объемном проценте. При использовании в качестве параметров плотность и размер частиц вместо объемного процента и размера частиц сравниваются независимые параметры. Данные об износе композитных покрытий Ni-SiC, представленные на рисунках 2 и 3, становятся более информативными, когда предстают в виде графиков по отношению к плотности осажденных частиц (рис. 6, 7).

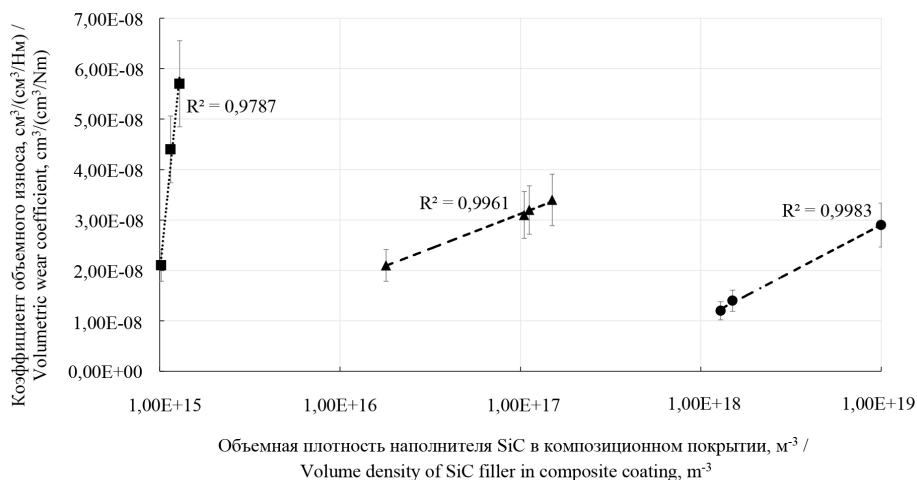


Р и с. 6. Коэффициент объемного износа при однонаправленном скольжении по композиту в зависимости от объемной плотности наполнителя SiC различных размеров

F i g. 6. The coefficient of volumetric wear during unidirectional sliding on the composite, depending on the volumetric density of the SiC filler of various sizes

Опираясь на данные рисунков 6 и 7, делаем вывод, что объемный коэффициент износа увеличивается при одно- и двунаправленных испытаниях на износ скольжения с увеличением плотности осажденных частиц SiC для трех размеров частиц в большинстве случаев.





Р и с. 7. Коэффициент объемного износа при двунаправленном скольжении по композиту в зависимости от объемной плотности наполнителя SiC различных размеров

F i g. 7. The coefficient of volumetric wear during bidirectional sliding on the composite, depending on the volumetric density of the SiC filler of various sizes

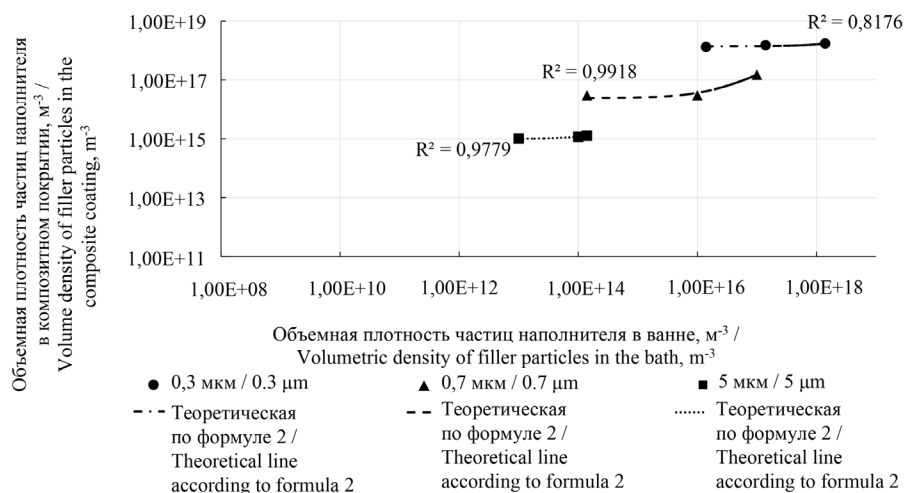
Объемный коэффициент износа сокращается в большинстве случаев с уменьшением размера частиц. Это означает, что низкий объемный процент субмикронных частиц SiC в композитных покрытиях Ni-SiC приводит к такой же стойкости к износу, как и покрытие, содержащее более высокий объемный процент микронных частиц.

Абразивный износ, наблюдаемый в следах износа после испытаний на скольжение, свидетельствует о том, что выкрашивающиеся частицы SiC оказывают негативное воздействие, когда остаются в зоне контакта скольжения. Таким образом, существует альтернатива между положительным увеличением твердости из-за укрепляющих частиц SiC, осажденных в никелевых покрытиях, и их негативным абразивным эффектом. Показатель твердости металлматричных композитов и их абразивный износ увеличивается при росте количества и размера абразивных частиц. Следовательно, уменьшение размера осажденных частиц в обоих случаях является положительным для формирования композитного покрытия. Однако увеличение показателя плотности частиц приводит к двум противоположным эффектам: 1) повышению твердости и механической прочности; 2) увеличению износа при абразивном воздействии.

На рисунке 8 показаны данные по плотности частиц в растворе для покрытия,  $n_s$ , и в покрытии,  $n_c$ .

Учитывая вышеизложенное, становится ясно, что плотность осажденных частиц SiC в 1–100 раз больше, чем плотность частиц в растворе для покрытия. Эффективность осаждения, определенная как отношение между плотностью частиц в покрытии и в растворе для покрытия, увеличивается для каждого размера частиц SiC с уменьшением плотности частиц в растворе для покрытия. Более важным является тот факт, что эффективность осаждения значительно увеличивается с уменьшением размера частиц. На рисунке 8 можно заметить скачок в плотности

осажденных частиц при заданной плотности частиц в растворе для покрытия, но при разном размере частиц. Следовательно, в отличие от очевидного результата (рис. 1), эффективность осаждения не снижается с уменьшением размера частиц. Напротив, при заданной плотности частиц в растворе для покрытия эффективность осаждения увеличивается с уменьшением размера частиц. Несмотря на то, что использованные различные частицы SiC были высокой чистоты, нельзя исключить, что частицы не только различаются по размеру, но и имеют разную поверхностную химию из-за своего происхождения. Таким образом, результаты на рисунке 8 могут быть либо вызваны различием в поверхностной химии, либо зависимостью осаждения от размера.



Р и с. 8. Зависимость плотности наполнителя в композитном покрытии от плотности частиц в растворе для нанесения покрытия

F i g. 8. Dependence of the filler density in the composite coating on the density of particles in the coating solution

Для различения между двумя альтернативными гипотезами была разработана модель, объясняющая результаты на основе эффекта размера. Предполагается, что плотность частиц, застрявших в покрытии за единицу объема,  $n_c$ , пропорциональна количеству частиц,  $n_s^*$ , которые застревают в покрытии за единицу времени, деленной на увеличение объема,  $\Delta V$ , покрытия за единицу времени:

$$n_c = \frac{n_s^*}{\Delta V}. \quad (1)$$

Увеличение объема происходит из закона Фарадея, учитывая вклад осажденных частиц, предполагая, что они монодисперсные и сферические:

$$\Delta V = \frac{Mi}{n\rho F} + \frac{\pi}{6}d^3n_s^*,$$

где  $F$  – постоянная Фарадея;  $n$  – валентность ионов металла;  $M$  – атомная масса металла;  $\rho$  – плотность металла;  $i$  – плотность тока;  $d$  – диаметр осажденных частиц.

Количество частиц  $n_s^*$ , которые застревают в покрытии, можно связать с плотностью частиц в растворе для покрытия  $n_s$ , введя коэффициент передачи  $A$  и вероятность  $P$ :

$$n_s^* = PAn_s,$$

где  $A$  – общий объем частиц, которые сталкиваются с электродом за единицу времени;  $P$  – вероятность того, что частицы останутся на поверхности покрытия и будут включены в катодное осаждение.

Этот коэффициент передачи  $A$  и вероятность  $P$ , очевидно, зависят от перемешивания ванны и гидродинамики. Подставив  $\Delta V$  и  $n_s^*$  в уравнение (1), получаем плотность осажденных частиц:

$$n_c = \frac{PAn_s}{\frac{Mi}{n\rho F} + \frac{\pi}{6}d^3PAn_s^*}. \quad (2)$$

Уравнение (2) содержит только один зависимый параметр, а именно  $PA$ , который связывает количество частиц, достигающих катода ( $A$ ), и вероятность того, что эти частицы останутся на катоде ( $P$ ).

Тот факт, что наши результаты соответствуют уравнению (2) с одним значением для  $PA$  (рис. 8), указывает на то, что положительный эффект связан с размером частиц, а не с изменением химии поверхности. Экстраполируя уравнение (2) к частицам SiC размером 0,1 мм, можно увидеть, что плотность осажденных частиц в покрытии будет более чем на два порядка больше, чем для частиц размером 0,7 мм. Это открывает интересные перспективы для достижения дисперсионного упрочнения в электролитических композиционных покрытиях, которые будут иметь повышенные износостойкие свойства.

**Обсуждение и заключение.** Износостойкость композиционных покрытий Ni-SiC показала зависимость от объема, занимаемого армирующими частицами, а также от их плотности. Скольжение износа композиционных покрытий Ni-SiC, содержащих различное количество частиц, было одинаковым для одно- и двунаправленного скольжения. Лучшая износостойкость против корундовых шаров была достигнута для покрытий Ni-SiC, содержащих 4–5 об. % частиц SiC размером 0,3 и 0,7 мм. Большой объем или плотность осажденных частиц снижает износостойкость. Уменьшение размера частиц положительно влияет на износостойкость. Это обусловлено благоприятным упрочнением за счет осажденных частиц и неблагоприятным абразивным износом из-за выдернутых из покрытия частиц. Было установлено, что при заданной плотности частиц в растворе для покрытия плотность осажденных частиц SiC увеличивается с уменьшением размера частиц. Таким образом, маленькие частицы SiC осаждаются легче, чем большие частицы. Основываясь на связи между плотностью осажденных частиц и плотностью частиц в растворе для покрытия, доказали, что размер и плотность частиц SiC в растворе для покрытия являются важными параметрами в процессе получения гальванических износостойких композиционных покрытий.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серникова О. С., Серебровский В. И., Калуцкий Е. С. Исследование износостойкости электроосажденных покрытий // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6 (45). С. 77–82. URL: <https://clck.ru/3DWw32> (дата обращения: 25.06.2024).
2. Новиков В. Ю. О механизме формирования микроструктуры при вторичной рекристаллизации в материале с дисперсными частицами второй фазы // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 1 (799). С. 9–15. EDN: EWUYVJ
3. Investigation on Corrosion Behavior and Mechanical Properties of an Extruded Mg-Zn-Al-Sn-Mn Alloy / Y. Bao [et al.] // Materials Characterization. 2021. Vol. 180. Article no. 111439. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111439>
4. Electrochemical Deposition of Composite Nickel-Graphene Oxide Coatings in the Reverse Mode / V. N. Tseluykin [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2022. Vol. 58. P. 321–324. <https://doi.org/10.1134/S2070205122020198>
5. Electrodeposition and Corrosion Properties of Nickel-Graphene Oxide Composite Coatings / V. Tseluikin [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14, Issue 19. <https://doi.org/10.3390/ma14195624>
6. Dispersion and Agglomeration Behaviors of Submicron Ceria Particles in Concentrated Slurries / Q. Wei [et al.] // Colloid and Polymer Science. 2021. Vol. 299. P. 1683–1694. <https://doi.org/10.1007/s00396-021-04894-7>
7. Sun M., Pang M. Defect Formation Mechanism and Performance Study of Laser Cladding Ni/Mo Composite Coating // Coatings. 2021. Vol. 11, Issue 12. <https://doi.org/10.3390/coatings11121460>
8. Щербаков И. Н., Гасанов Б. Г. Кинетика формирования трехслойного функционального фосфорсодержащего композиционного покрытия // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18, № 4. С. 165–169. EDN: WBHVDM
9. Strong Hydrophobic and Ultraviolet Reflective Film from Fluorinated Polyisoprene with Microphase Separation via Thiol-Epoxy Click Chemistry / H. Liu [et al.] // Macromolecular Chemistry and Physics. 2022. Vol. 223, Issue 18. <https://doi.org/10.1002/macp.202200100>
10. Kanaev A. T., Sarsembaeva T. E., Gulyarenko A. A. Modernization of the Surface Layer Structure of Heavily Loaded Parts of Tillage Machines with Plasma Hardening // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. P. 363–368. <https://doi.org/10.3103/s0967091222030068>
11. Electrochemical Deposition and Properties of Nickel-Chromium-Graphene Oxide Composite Coatings / V. N. Tseluikin [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2021. Vol. 57. P. 1231–1234. <https://doi.org/10.1134/S2070205121060198>
12. Research Status of Graphene Oxide Composite Coatings on Magnesium Alloys / Y. N. Chen [et al.] // Materials Engineering. 2021. Vol. 49, Issue. 12. P. 1–13. <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2021.000291>
13. Preparation of Nickel-Coated Graphene and Evaluation of Infrared Interference Performance / K. Li [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2194. Article no. 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2194/1/012043>
14. Preparation and Electrochemical Properties of  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  Cathode Materials from Spent Electroless Nickel Plating Bath / W. Xu [et al.] // Materials Research Express. 2022. Vol. 9, No. 6. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac7a95>
15. Electrochemical Characteristics of Various Ni-P Composite Coatings in 0.6 M NaCl Solution / M. Azadi [et al.] // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2021. Vol. 74. P. 137–147. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02125-1>
16. Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями / О. Г. Девойно [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 6. С. 450–459. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>
17. Електроосадження нанокристалічного сплаву нікель-залізо з електроліту на основі нового типу йонних рідин – низькотемпературного евтектичного розчинника / В. Проценко [и др.] // Праці НТШ. Хімічні науки. 2022. Vol. LXX. P. 119–127. <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.119>

18. Microstructure, Composition and Formation Mechanism of Ultra-Black Surfaces on the Electrodeposited Nickel-Phosphorous Coatings / S. Perevovnikov [et al.] // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Vol. 32. Article no. 102127. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102127>
19. Enhancement of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Electrodeposited Ni-P-TiC Composite Coatings / O. Fayyaz [et al.] // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article no. 5327. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84716-6>
20. Investigating the Properties of Electrodeposited of Ni-P-ZrC Nanocomposite Coatings / O. Fayyaz [et al.] // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, Issue 49. P. 33310–33324. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03117>
21. Volosova M. A., Okunkova A. A. Study of the Influence of Silicon-Containing Diamond-Like Carbon Coatings on the Wear Resistance of SiAlON Tool Ceramics // *C (Journal of Carbon Research)*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. 50. <https://doi.org/10.3390/c9020050>
22. Агеев Е. В., Серебровский В. И. Разработка и исследование технологии восстановления и упрочнения изношенных деталей машин композиционными гальваническими покрытиями с применением в качестве упрочняющей фазы вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков микро- и нанодисперсий // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 2. С. 42–66. URL: <https://techusgu.elpub.ru/jour/article/view/103> (дата обращения: 15.03.2024).
23. Массоперенос при гальваническом осаждении покрытий с выравнивающей добавкой / С. Ю. Жачкин [и др.] // *Наука в центральной России*. 2022. № 2 (56). С. 134–142. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-134-142>
24. Пластическая твердость композиционных покрытий на основе хрома / С. Ю. Жачкин [и др.] // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62, № 1. С. 94–100. EDN: SKKMBV
25. Оксидное волокно с покрытием карбида кремния для создания композиционных материалов / В. Г. Бабашов [и др.] // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). С. 94–104. EDN: ZGETNP
26. Слепцова Е. Р., Джумаев П. С., Исаев Р. Ш. Повышение коррозионной стойкости карбида кремния методом нанесения защитных покрытий // *Физика конденсированных состояний : сб. тезисов III Междунар. конф., посвященной 60-летию ИФТТ РАН (29 мая – 2 июня 2023 г., г. Черногловка) / под ред. Б. Б. Страумала. Черногловка : Институт физики твердого тела РАН, 2023. С. 64. <https://doi.org/10.26201/ISSP.2023/FKS-3.61>*

## REFERENCES

1. Sernikova O.S., Serebrovsky V.I., Kalutsky E.S. Study of Wear Resistance of Electrodeposited Coatings. *Sovremennye Materialy, Tekhnika i Tekhnologii*. 2022;6(45):77–82. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3DWw32> (accessed 25.06.2024).
2. Novikov V.Yu. Mechanism of Formation of Microstructure Under Secondary Recrystallization in a Material with Disperse Particles of Second Phase. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;1(799):9–15. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EWUYVJ
3. Bao Y., Chen L., Tang J., Li Z., Zhao G., Zhang C. Investigation on Corrosion Behavior and Mechanical Properties of an Extruded Mg-Zn-Al-Sn-Mn Alloy. *Materials Characterization*. 2021;180:111439. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111439>
4. Tseluykin V.N., Zakirova S.M., Mostovoy A.S., Yakovlev A.V., Dzhumieva A.S. Electrochemical Deposition of Composite Nickel-Graphene Oxide Coatings in the Reverse Mode. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022;58:321–324. <https://doi.org/10.1134/S2070205122020198>
5. Tseluikin V., Dzhumieva A., Yakovlev A., Mostovoy A., Zakirova S., Strilets A., [et al.] Electrodeposition and Corrosion Properties of Nickel-Graphene Oxide Composite Coatings. *Materials*. 2021;14(19). <https://doi.org/10.3390/ma14195624>
6. Wei Q., Luo Z., Yang Q., Gao W. Dispersion and Agglomeration Behaviors of Submicron Ceria Particles in Concentrated Slurries. *Colloid and Polymer Science*. 2021;299:1683–1694. <https://doi.org/10.1007/s00396-021-04894-7>



7. Sun M., Pang M. Defect Formation Mechanism and Performance Study of Laser Cladding Ni/Mo Composite Coating. *Coatings*. 2021;11(12). <https://doi.org/10.3390/coatings11121460>
8. Shcherbakov I.N., Gasanov B.G. Kinetics of Formation of a Three-Layer Functional Phosphorus-Containing Composite Coating. *Hardening Technologies and Coatings*. 2022;18(4):165–169. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [WBHVDM](https://doi.org/10.1002/macp.202200100)
9. Liu H., Cheng Sh., Yang Ya., Wang Ch., Zhu Sh., Zhao F. Strong Hydrophobic and Ultraviolet Reflective Film from Fluorinated Polyisoprene with Microphase Separation via Thiol-Epoxy Click Chemistry. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2022;223(18). <https://doi.org/10.1002/macp.202200100>
10. Kanaev A.T., Sarsembaeva T.E., Gulyarenko A.A. Modernization of the Surface Layer Structure of Heavily Loaded Parts of Tillage Machines with Plasma Hardening. *Steel in Translation*. 2022;52:363–368. <https://doi.org/10.3103/s0967091222030068>
11. Tseluikin V.N., Dzhumieva A.S., Yakovlev A.V., Mostovoy A.S. Electrochemical Deposition and Properties of Nickel-Chromium-Graphene Oxide Composite Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021;57:1231–1234. <https://doi.org/10.1134/S2070205121060198>
12. Chen Y.N., Wu L., Chen Y.H., Cheng L., Yao W.H., Pan F.S. Research Status of Graphene Oxide Composite Coatings on Magnesium Alloys. *Materials Engineering*. 2021;49(12):1–13. <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2021.000291>
13. Li K., Wang X., Gao Ya., Dong W., Li H. Preparation of Nickel-Coated Graphene and Evaluation of Infrared Interference Performance. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2194:012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2194/1/012043>
14. Xu W., Yang H., Liu W., Qin M., Shen B., Wang W., [et al.] Preparation and Electrochemical Properties of  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  Cathode Materials from Spent Electroless Nickel Plating Bath. *Materials Research Express*. 2022;9(6). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac7a95>
15. Azadi M., Tavakoli H., Haghhighatkah S., Eranegh F.A. Electrochemical Characteristics of Various Ni-P Composite Coatings in 0.6 M NaCl Solution. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021;74:137–147. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02125-1>
16. Devoino O.G., Turichin G.A., Kardapolava M.A., Kasach Y.I., Pogudo E.V., Kasyakova I.M. Tribotechnical Characteristics of Nickel-Based Composite Coatings Obtained by Hybrid Technologies. *Science and Technology*. 2023;22(6):450–459. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>
17. Protsenko V., Pavlenko L., Sukhatskyi O., Butyrina T., Danilov F. Electrodeposition of Nanocrystalline Nickel-Iron Alloy from an Electrolyte Based on a New Type of Ionic Liquids – Deep Eutectic Solvent. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Series Chemical Sciences*. 2022;LXX:119–127. (In Ukr., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.119>
18. Perevoznikov S., Tsybul'skaya L., Shend'yukov V., Scharnagl N. Microstructure, Composition and Formation Mechanism of Ultra-Black Surfaces on the Electrodeposited Nickel-Phosphorous Coatings. *Surfaces and Interfaces*. 2022;32:102127. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102127>
19. Fayyaz O., Khan A., Shakoor R.A., Hasan A., Yusuf M.M., Montemor M.F., [et al.] Enhancement of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Electrodeposited Ni-P-TiC Composite Coatings. *Scientific Reports*. 2021;11:5327. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84716-6>
20. Fayyaz O., Radwan A.B., Sliem M.H., Abdullah A.M., Hasan A., Shakoor R.A. Investigating the Properties of Electrodeposited of Ni-P-ZrC Nanocomposite Coatings. *ACS Omega*. 2021;6(49):33310–33324. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03117>
21. Volosova M.A., Okunkova A.A. Study of the Influence of Silicon-Containing Diamond-like Carbon Coatings on the Wear Resistance of SiAlON Tool Ceramics. *C (Journal of Carbon Research)*. 2023;9(2):50. <https://doi.org/10.3390/c9020050>
22. Ageev E.V., Serebrovsky V.I. Development and Research of Technology for Restoration and Strengthening of Worn Machine Parts by Composite Electroplating Coatings Using Micro- and Nanofractions Containing Tungsten-Containing Electroerosive Powders as the Strengthening Phase. *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology*. 2021;11(2):42–66. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://techusgu.elpub.ru/jour/article/view/103> (accessed 15.03.2024).

23. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Nevstruev Yu.A., Biryukov A.V., Vlasov D.A. Mass Transfer During Galvanic Deposition of Coatings with a Leveling Additive. *Science in the Central Russia*. 2022;2(56):134–142. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-134-142>

24. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V. Plastic Hardness of Composite Coatings Based on Chrome. *Machinery Technical Service*. 2024;62(1):94–100. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: SKKMBV

25. Babashov V.G., Varrik N.M., Maksimov V.G., Samorodova O.N. Oxide Fiber Coated with Silicon Carbide for Producing Composite Materials. *Aviation Materials and Technologies*. 2021;3(64):94–104. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZGETNP

26. Slepsova E.R., Dzhumaev P.S., Isaev R.Sh. [Increasing the Corrosion Resistance of Silicon Carbide by Applying Protective Coatings]. In: Straumal B.B., ed. *Physics of Condensed States: a Collection of Abstracts of the III International Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the IFTT RAS (Chernogolovka, May 29 – June 2, 2023)*. Chernogolovka: Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences; 2023. (In Russ.) <https://doi.org/10.26201/ISSP.2023/FKS-3.61>

*Об авторах:*

**Жачкин Сергей Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, Researcher ID: AAC-7580-2022, Scopus ID: 57210973083, SPIN-код: 9374-2996, zhach@list.ru

**Трифонов Григорий Игоревич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>, SPIN-код: 9499-2510, grishakip@yandex.ru

**Сидоркин Олег Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1249-0776>, sidorkinoa@rambler.ru

**Пустоветов Алексей Владимирович**, аспирант кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (394087, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4114-6689>, pusovetovav@rambler.ru

*Заявленный вклад авторов:*

С. Ю. Жачкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка цели и задач исследования, формирование частных и общих выводов.

Г. И. Трифонов – проведение исследования, подготовка текста, обработка экспериментальных данных и их контрфактуальный анализ.

О. А. Сидоркин – проведение анализа информационных источников, обработка изображений, корректировка общих и частных выводов.

А. В. Пустоветов – анализ и обработка итогового варианта текста, обработка экспериментальных данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 15.07.2024; поступила после рецензирования 05.08.2024;  
принята к публикации 12.08.2024*

*About the authors:*

**Sergey Yu. Zhachkin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Teacher, Military Training and Scientific Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, Researcher ID: AAC-7580-2022, Scopus ID: 57210973083, SPIN-code: 9374-2996, zhach@list.ru

**Gregory I. Trifonov**, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher, Military Training and Scientific Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>, SPIN-code: 9499-2510, grishakip@yandex.ru

**Oleg A. Sidorkin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Military Training and Scientific Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1249-0776>, sidorkinoa@rambler.ru

**Alexey V. Pustovetov**, Postgraduate Student of the Department of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (1 Michurina St., Voronezh 394087, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4114-6689>, pusovetovav@rambler.ru

*Authors contribution:*

S. Yu. Zhachkin – scientific guidance, formulation of the study basic concept, setting the goals and objectives of the study, forming particular and general conclusions.

G. I. Trifonov – conducting the study, preparing the text, processing the experimental data and their counterfactual analysis.

O. A. Sidorkin – analyzing information sources, image processing, correcting general

A. V. Pustovetov – analyzing and processing of the final version of the text, processing of experimental data.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 15.07.2024; revised 05.08.2024; accepted 12.08.2024*



# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.648-667>

EDN: <https://elibrary.ru/rbxwhz>

УДК 537.3:537.5

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6524

<http://vestnik.mrsu.ru>

*Оригинальная статья / Original article*



## Моделирование разряда суперконденсаторного накопителя при стабилизации тока в обмотках многосекционной магнитной системы

П. В. Выходцев ✉, В. В. Ростов, А. С. Степченко

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
(г. Томск, Российская Федерация)*

✉ [pave.vykhodtsev@mail.ru](mailto:pave.vykhodtsev@mail.ru)

### *Аннотация*

*Введение.* Питание магнитных систем мощных микроволновых генераторов, таких как релятивистские лампы обратной волны и клистроны, постоянным током до 1 000 А в течение нескольких секунд осуществляется от суперконденсаторных накопителей. При проектировании источников питания для таких магнитных систем всегда возникает необходимость в определении энергетических характеристик накопителя. Аналитический расчет этих характеристик затруднен по причине динамического изменения некоторых параметров магнитной системы и накопителя во время протекания тока.

*Цель исследования.* Создание и экспериментальная проверка математической модели, описывающей процесс питания многосекционной магнитной системы постоянным током от суперконденсаторного накопителя.

*Материалы и методы.* При составлении модели учитывается динамическое изменение параметров магнитной системы при протекании тока, а суперконденсаторный накопитель представляется в виде простой RC-цепи, параметрами которой являются паспортные значения его емкости и внутреннего сопротивления. Процесс разряда накопителя описывается на основании энергетического баланса. Модель реализована в программном пакете National Instruments LabView 2012 и имеет удобный графический интерфейс. Результаты моделирования были проверены на оборудовании, состоящем из источника питания на основе суперконденсаторного накопителя и двухсекционной магнитной системы.

*Результаты исследования.* В процессе моделирования были выявлены сходства с экспериментальными данными. По результатам эксперимента форма тока и напряжения накопителя, а также максимальная продолжительность стабилизации тока оказались близкими к результатам моделирования. При этом паспортные значения емкости и внутреннего сопротивления накопителя качественно отражают его реальные характеристики с учетом особенностей работы совместно с регулятором тока и импульсным характером потребления энергии.

© Выходцев П. В., Ростов В. В., Степченко А. С., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



*Обсуждение и заключение.* Небольшое отличие в результатах объясняется отклонением реальных параметров накопителя от паспортных значений, а также различием температуры обмоток в эксперименте и моделировании. Использование энергетического баланса для расчета выходного напряжения накопителя позволяет масштабировать нагрузку путем добавления любого количества потребителей энергии с независимой стабилизацией тока в каждом.

**Ключевые слова:** магнитная система, накопитель энергии, суперконденсатор, энергетические характеристики, стабилизация тока, моделирование, энергетический баланс

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Выходцев П. В., Ростов В. В., Степченко А. С. Моделирование разряда суперконденсаторного накопителя при стабилизации тока в обмотках многосекционной магнитной системы // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 648–667. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.648-667>

## Simulation of the Discharge of a Supercapacitor Storage Device during Current Stabilization in the Windings of a Multi-Section Magnetic System

P. V. Vykhodtsev , V. V. Rostov, A. S. Stepchenko

*Institute of high current electronics SB RAS*

*(Tomsk, Russian Federation)*

 [pave.vykhodtsev@mail.ru](mailto:pave.vykhodtsev@mail.ru)

### **Abstract**

**Introduction.** The magnetic systems of high power microwave generators, such as relativistic reverse wave lamps and klystrons, are powered with a direct current of up to 1 000 A from supercapacitor storage for several seconds. When designing power supplies for these magnetic systems, there is always necessary to determine the energy characteristics of the storage device. The analytical calculation of the characteristics is difficult, because of dynamic changes in some parameters of the magnetic system and storage device during current flow.

**Aim of the Study.** The aim of the article is to create and experimentally test a mathematical model describing the process of powering a multi-section magnetic system with direct current from a supercapacitor storage device.

**Materials and Methods.** The simulation takes into account the dynamic changes in the magnetic system parameters when current flows. The supercapacitor storage device is represented as a simple RC-circuit, the parameters of which are the nameplate data of its capacitance and internal resistance. The description of a storage device discharge process is based on the energy balance data. This model is implemented in the National Instruments LabView 2012 software package and has a user-friendly graphical interface. The simulation results were tested on equipment consisting of a power supply based on a supercapacitor storage device and two-section magnetic system.

**Results.** The simulation results showed a good agreement with the experimental ones. According to the experiment results, the waveform of the current and voltage of the storage device, and the maximum duration of current stabilization were close to the simulation results. At the same time, the nameplate data of the capacity and internal resistance of the storage device characterize well its real parameters, taking into account the peculiarities of working together with the current regulator and the pulsed nature of energy consumption.

**Discussion and Conclusion.** The slight difference in the results is explained by the deviation of the actual parameters of the storage device from its passport data and by the difference in the temperature of the windings used in the experiment and simulation. The calculation of the energy characteristics of the storage device is performed on the basis of the energy balance, which allows scaling the load through adding any number of energy consumers with independent current stabilization in each.

**Keywords:** magnetic system, energy storage, supercapacitor, energy characteristics, current stabilization, simulation, energy balance

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Vykhodtsev P.V., Rostov V.V., Stepchenko A.S. Simulation of the Discharge of a Supercapacitor Storage Device during Current Stabilization in the Windings of a Multi-Section Magnetic System. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):648–667. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.648-667>

**Введение.** В мощных микроволновых генераторах, таких как релятивистские лампы обратной связи (ЛОБ)<sup>1</sup> [1–3], клистроны<sup>2</sup>, для транспортировки электронного пучка необходимо магнитное поле с индукцией 0,5–3 Тл. Для формирования таких полей в объемах от 500 до 15 000 см<sup>3</sup> с помощью соленоидов<sup>3</sup> требуется от 15 до 300 кВт электрической мощности, что предъявляет серьезные требования к источнику питания и организации охлаждения обмотки<sup>4</sup>. Использование импульсно-периодических ускорителей семейства СИНУС [4; 5] для питания микроволновых генераторов на основе релятивистских ЛОБ позволяет им работать в импульсно-периодическом режиме с различной, вплоть до непрерывной, продолжительностью. По причине высокой потребляемой мощности, продолжительность существования магнитного поля с необходимой для работы микроволнового генератора индукцией в большинстве случаев будет определять продолжительность работы пары ЛОБ–СИНУС.

Для решения большинства задач научно-исследовательского характера не требуется длительной непрерывной работы магнитной системы. Использование накопителя электрической энергии позволяет организовать работу магнитной системы в импульсно-периодическом режиме с продолжительностью работы до нескольких секунд и минутными паузами между последовательностями. При этом подзарядка накопителя и охлаждение обмоток магнитной системы производятся во время пауз. Учитывая свойства и характеристики, а также предполагаемый режим работы, авторы исследований<sup>5</sup> [6–8] отмечают, что для питания магнитных систем наиболее подходящим является накопитель на основе суперконденсаторов. При использовании такого накопителя ток в обмотке магнитной системы стабилизируется по мере его разряда. Так как обмотка магнитной системы представляет собой нагрузку активно-индуктивного типа, наиболее подходящей схемой для регулировки и стабилизации тока является схема регулятора тока понижающего типа<sup>6</sup>. Минимальный уровень напряжения, до которого можно разрядить накопитель, определяется эффективным постоянным напряжением обмотки магнитной системы, под которым понимается падение напряжения на ее активном сопротивлении при протекании постоянного

<sup>1</sup> Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. *High Power Microwaves*. New York : Taylor&Francis Group, 2007. 446 p.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Лагутин А. С., Ожогин В. И. *Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте*. М. : Энергоатомиздат, 1988. 192 с. URL: <https://clck.ru/3EEzVU> (дата обращения: 17.05.2024); Монтгомери Д. *Получение магнитных полей с помощью соленоидов*. М. : Мир, 1971. 358 с.

<sup>4</sup> Монтгомери Д. *Получение магнитных полей с помощью соленоидов*.

<sup>5</sup> Conway B. *Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York : Kluwer Academic / Plenum, 1999. 698 p.

<sup>6</sup> Мелешин В. И. *Транзисторная преобразовательная техника*. М : Техносфера, 2005. 627 с.

тока заданной величины [9]. Продолжительность стабилизации тока в обмотке будет определяться энергозапасом накопителя и эффективностью использования запасенной в нем энергии, которая определяется диапазоном рабочих напряжений. При проектировании таких источников питания возникает необходимость в выявлении энергетических характеристик накопителя. Под этим понимается определение емкости и зарядного напряжения, при которых обеспечивается протекание постоянного тока в обмотках магнитной системы в течение заданного времени.

Целью работы является создание математической модели, в которой описывается процесс питания многосекционной магнитной системы постоянным током от суперконденсаторного накопителя и учитывается динамическое изменение всех влияющих на потребление энергии параметров. Модель предназначена для проведения инженерных расчетов энергетических характеристик накопителя, используемого для питания постоянным током обмоток двухсекционной магнитной системы с независимой регулировкой и стабилизацией тока в каждой.

**Обзор литературы.** В общем случае питание обмоток магнитных систем от емкостного накопителя стабилизированным постоянным током представляет собой разряд накопителя постоянной мощностью. На основании этого проводится оценка энергетических характеристик накопителя в работах [10–12]. Под этим понимается определение максимальной длительности стабилизации тока в обмотке магнитной системы при ее питании от накопителя емкостью  $C$ , заряженного до напряжения  $U_0$ :

$$T_{\text{стаб}} = \frac{C(U_0^2 - U_{C_{\min}}^2)}{2P_S} = \frac{C((U_{C_0} - I_S r_0)^2 - (I_S R_S)^2)}{2I_S^2 R_S}, \quad (1)$$

где  $U_0$  – напряжение на накопителе в момент начала стабилизации тока, В;  $U_{C_0}$  – напряжение зарядки накопителя, В;  $U_{C_{\min}}$  – минимально возможное напряжение разряда накопителя, равное эффективному постоянному напряжению обмотки  $U_{C_{\min}} = U_S = I_S R_S$ , В;  $P_S$  – мощность, выделяемая в обмотке магнитной системы;  $R_S$  – активное сопротивление обмотки, Ом;  $r_0$  – внутреннее сопротивление накопителя, Ом;  $I_S$  – величина тока в обмотке, А.

Считается, что при оценке энергетических характеристик по формуле (1) в обмотке течет постоянный ток, а ее сопротивление является постоянной величиной. В то же время при протекании тока по обмотке на ее активном сопротивлении рассеивается вся потребляемая мощность, значение которой может достигать нескольких сотен кВт. При этом температура обмотки может повышаться со скоростью до нескольких десятков градусов в секунду, вследствие чего будет наблюдаться рост ее активного сопротивления. По этой причине будет иметь место рост потребляемой мощности и постоянного эффективного напряжения обмотки, определяющего минимальное напряжение разряда накопителя. В формуле (1) также не учитываются потери энергии на внутреннем сопротивлении накопителя и расход энергии на переходной процесс, связанный с нарастанием тока в обмотке до заданной величины  $I_S$ . Все вышперечисленные факторы в разной степени влияют на результат вычисления. В работе [9] при оценке энергетических характеристик впервые был произведен учет потерь на внутреннем сопротивлении накопителя, что существенно повысило достоверность результатов вычисления. В случае питания

от общего накопителя многосекционных магнитных систем, имеющих различные параметры секций, уровень тока и потребляемую мощность, аналитический расчет его энергетических характеристик по формуле (1) затруднен.

Особенности поведения суперконденсаторов также вносят дополнительные сложности в аналитический расчет энергетических характеристик накопителей на их основе. Одной из особенностей является то, что его эквивалентная схема не может быть представлена в виде простой RC-цепи [13–15]. В простейшем случае она состоит из двух ветвей, представленных в виде RC-цепей, соединенных параллельно и имеющих разные постоянные времени [13; 14]. Количество параллельных ветвей, имеющих различные соотношения емкости и постоянные времени, в разрядной модели суперконденсатора может достигать пяти [16]. Основная (быстрая) ветвь описывает изменение энергии во время заряда или разряда, вторая (медленная) ветвь дополняет основную и описывает внутреннее перераспределение энергии. Согласно такой модели внутреннее перераспределение заряда между ветвями в процессе работы приводит к изменению напряжения на клеммах накопителя без какого-либо обмена зарядом между ним и внешними потребителями. Другой особенностью является некоторая зависимость его емкости от зарядного напряжения<sup>7</sup> [13]. При этом полная емкость суперконденсатора представляется в виде суммы его постоянной емкости  $C_0$  и дифференциальной емкости  $C_{\text{дифф}}$ , линейно зависящей от напряжения. Таким образом, при заряде и разряде суперконденсаторов их емкость меняется согласно следующему выражению  $C(U) = C_0 + k \cdot U$ , в котором  $k = \text{const}$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность [Ф/В].

В то же время в качестве паспортного параметра суперконденсаторных накопителей указывается номинальная емкость [8], которая является постоянной величиной и не зависит от напряжения. Согласно [16; 17] существует множество методик и стандартов измерения параметров суперконденсаторов, но результаты, полученные с использованием различных процедур тестирования, могут существенно отличаться. В настоящее время большинство как отечественных, так и мировых производителей используют метод<sup>8</sup> для определения номинальной емкости своих изделий. Согласно данному методу емкость суперконденсатора оценивается на основании его разряда постоянным током с 80 до 40 % от максимального зарядного напряжения и представляет собой некоторую эквивалентную емкость, запасующую такое же количество заряда или энергии, что и линейный конденсатор в том же диапазоне напряжений.

Составление схемной модели такого источника питания с последующим моделированием в специализированных программных пакетах представляет собой

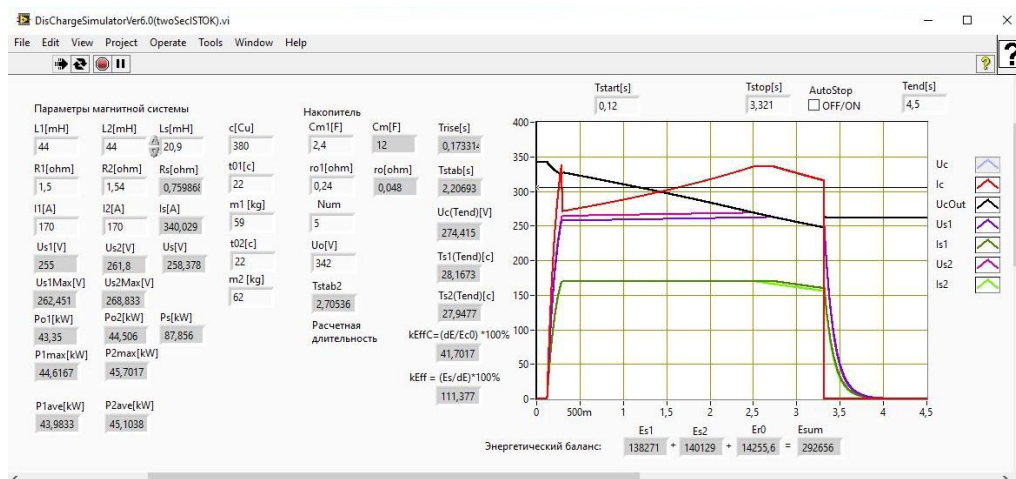
<sup>7</sup> Conway B. Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications; Kurzweil P., Frenzel B., Gallay R. Capacitance Characterization Methods and Ageing Behaviour of Supercapacitors // Proc. the 15<sup>th</sup> International Seminar on Double Layer Capacitors (5 – 7 December 2005, Deerfield Beach, Fl., USA). Deerfield Beach, 2005. P. 1–12. URL: <https://clck.ru/3DpjS5> (дата обращения: 21.05.2024).

<sup>8</sup> IEC 62391-2-1:2006. International Standard. Fixed Electric Double Layer Capacitors for Use in Electronic Equipment. Part 2-1: Blank Detail Specification – Electric Double-Layer Capacitors for Power Applications – Assessment Level EZ. URL: <https://clck.ru/3DpjYa> (дата обращения: 21.05.2024); ГОСТ Р МЭК 62391-1-2023. Конденсаторы постоянной емкости с двойным электрическим слоем для электрического и электронного оборудования. Часть 1. Общие технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 50 с. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=255075> (дата обращения: 21.05.2024).

определенную сложность ввиду наличия в схеме нестандартных функциональных блоков, таких как регуляторы тока и магнитная система, и необходимостью аналитического описания их поведения. Схемная реализация магнитной системы также представляет некоторую сложность в виду необходимости учета ее неэлектрических параметров, таких как масса и температура, и их влияние на характеристики магнитной системы.

**Материалы и методы.** Для расчета энергетических характеристик накопителя была составлена математическая модель, которая на основании энергетического баланса описывает процесс питания постоянным током двухсекционной магнитной системы от емкостного накопителя. Под энергетическим балансом понимается то, что полная энергия, потребленная из накопителя, равняется сумме энергий, рассеянных на активном сопротивлении обмоток магнитной системы и внутреннем сопротивлении накопителя. Данная модель также учитывает динамическое изменение параметров магнитной системы при протекании тока. При этом суперконденсаторный накопитель представляется в виде простой RC-цепи, параметрами которой являются паспортные значения его емкости и внутреннего сопротивления.

Модель реализована в виде прикладного ПО в среде National Instruments LabView 2012 и имеет удобный графический интерфейс пользователя (рис. 1). Это позволяет применять ПО для инженерных расчетов на любом персональном компьютере.



Р и с. 1. Интерфейс ПО

F i g. 1. Software GUI

Источник: составлено авторами статьи в программе National Instruments LabView 2012.

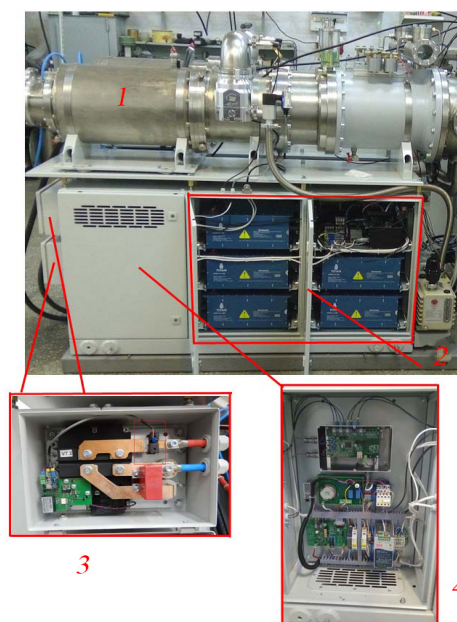
Source: compiled by the authors of the article in the program National Instruments LabView 2012.

Источник электрической энергии, на котором проводилась проверка результатов моделирования, предназначен для питания двухсекционной магнитной системы постоянным током 160–180 А в течение нескольких секунд. Данная магнитная система, формирующая магнитное поле с максимальной индукцией до 0,8 Тл в трубчатом канале диаметром 180 мм и длиной 560 мм, используется

в составе микроволнового генератора на основе релятивистской ЛОВ [1; 2] и ускорителя семейства СИНУС [4; 5]. При активном сопротивлении каждой секции, равном 1,5 Ом, максимальная суммарная выходная мощность обоих каналов источника достигала 90 кВт. Максимальная длительность протекания тока на предельной мощности достигает 2,5 с. Длительность паузы между импульсами тока составляет несколько минут, что необходимо для подзарядки накопителя и охлаждения обмоток магнитной системы.

Охлаждение магнитной системы осуществляется путем прокачки трансформаторного масла между секциями обмоток, с последующим его охлаждением в водно-масляном теплообменнике. По причине низкой удельной теплоемкости и температуропроводности трансформаторного масла и большой тепловой мощности, выделяемой на активном сопротивлении обмоток, охлаждение обмоток осуществляется в паузах между работой микроволнового генератора. При этом приращение температуры обмоток за время протекания тока ограничено лишь их теплоемкостью. Таким образом, конечная температура обмотки будет определять длительность стабилизации тока и эффективность использования энергии накопителя.

Внешний вид магнитной системы с источником питания приведен на рисунке 2, структурная схема источника питания приведена на рисунке 3.



Р и с. 2. Внешний вид магнитной системы с источником питания:

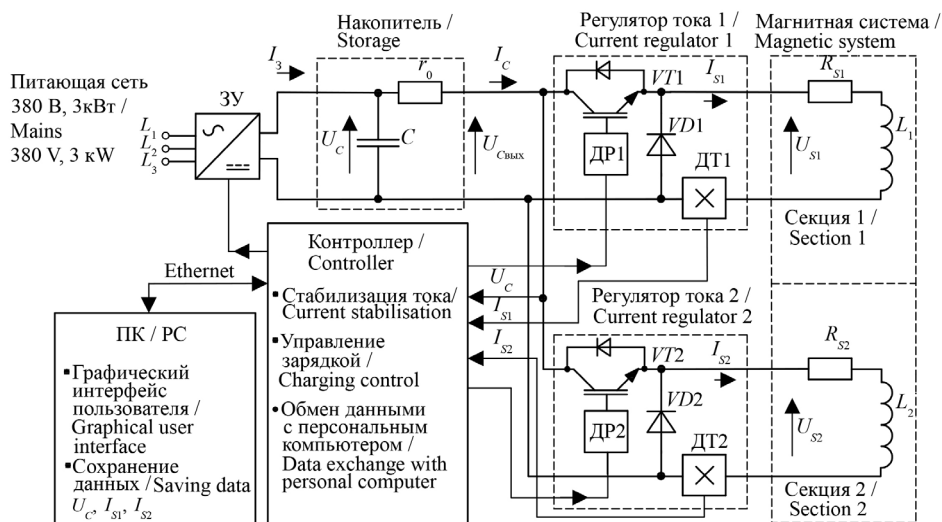
1 – магнитная система; 2 – накопитель; 3 – регуляторы тока;  
4 – контроллер с элементами схемы зарядки и разрядки

F i g. 2. Appearance of magnetic system with its power supply:

1 – magnetic system; 2 – supercapacitor storage; 3 – current regulators; 4 – controller with parts of charging and discharging circuit

*Источник:* здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

*Source:* hereinafter in this article the figures are compiled by the authors of the article.



Р и с. 3. Структурная схема источника питания

F i g. 3. Power supply block diagram

*Примечание:* ЗУ – зарядное устройство; ДР – драйвер IGBT-модуля; ДТ – датчик тока; ПК – персональный компьютер.

*Note:* ЗУ – charging device; ДР – driver of IGBT switching module; ДТ – current sensor; ПК – personal computer.

Источник питания состоит из накопителя и двух параллельно подключенных к нему регуляторов тока понижающего типа<sup>9</sup>, стабилизирующих ток в обмотках магнитной системы. Система управления источником включает в себя контроллер и персональный компьютер.

Накопитель состоит из пяти включенных параллельно модульных накопителей НСКБ-2.4-360<sup>10</sup>. Паспортное значение емкости этих модулей составляет 2,4 Ф, а внутреннее сопротивление – 240 мОм. Согласно паспортным данным суммарная емкость и внутреннее сопротивление накопителя составляют 12 Ф и 48 мОм соответственно. Накопитель заряжается до рабочего напряжения 340–350 В постоянным током от зарядного устройства, максимальный выходной ток которого составляет 7,5 А, при этом выходная мощность достигает значения 3 кВт. В качестве зарядного устройства используется стабилизированный источник питания с регулируемыми выходными параметрами ИПС-3000-380/500В-7,5А-3UR<sup>11</sup>. Максимальная энергия, запасаемая в накопителе на номинальном зарядном напряжении 350 В, при паспортном значении емкости 12 Ф составляет 735 кДж.

В качестве ключей  $S$  и диодов  $VD$  регуляторов тока используются IGBT-модули МДТКИ 400-12К. Выходной ток регуляторов тока измеряется стандартными

<sup>9</sup> Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника.

<sup>10</sup> Системы накопления энергии [Электронный ресурс]. URL: <https://titanps.ru/product/sistemy-nakopleniya-energii/> (дата обращения: 21.05.2024).

<sup>11</sup> Выпрямители с регулируемым выходным напряжением и током [Электронный ресурс]. URL: <http://vorpostnsk.ru/catalog/ips/vypryamiteli-s-reguliruemym-vykhodnym-napryazheniem-i-tokom/isp500v/> (дата обращения: 21.05.2024).



датчиками ДТ1 и ДТ2, работающими на основе эффекта Холла. Работой ключей управляет контроллер по релейному закону регулирования<sup>12</sup>. Максимальная частота коммутации ключей не превышает 4 кГц и определяется требуемой величиной пульсаций тока в обмотках, значениями их сопротивления и индуктивности, а также выходным напряжением накопителя [9].

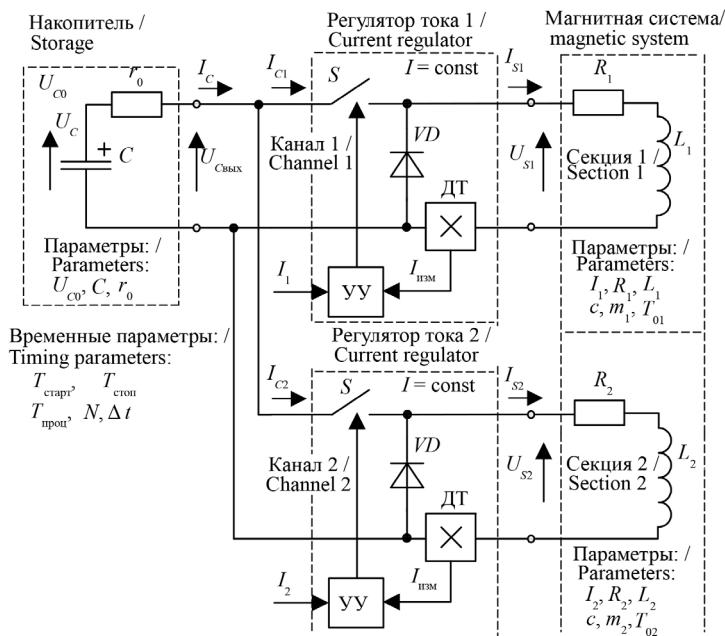
Контроллер, выполненный на базе микропроцессора, измеряет и регулирует ток в секциях магнитной системы, измеряет напряжение и зарядный ток накопителя, также управляет его зарядкой и разрядкой, передает данные в персональный компьютер. Особенностью данного источника является тесная интеграция его системы управления в общую систему управления микроволновым генератором. На персональном компьютере установлена общая управляющая программа, в которой реализован графический интерфейс пользователя. В этой программе задаются и хранятся все настройки источника тока и ускорителя, а также отображаются осциллограммы тока в обмотках магнитной системы и выходного напряжения накопителя. В дальнейшем все осциллограммы и массивы данных сохраняются на жестком диске в виде файла истории. Связь между компьютером и контроллером осуществляется по протоколу TCP/IP.

Для последующего сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования используются полученные из управляющей программы массивы значений тока и напряжения. Эти значения измеряются контроллером источника питания. Калибровка всех измерительных трактов контроллера производилась с помощью прецизионных источников тока и напряжения. Временной шаг  $\Delta t$  получения хранящихся в массивах данных составляет 1 мс. Обработка и сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования производилась в программной среде Microsoft Excel.

**Результаты исследования.** Схема питания двухсекционной магнитной системы, для которой реализована математическая модель, приведена на рисунке 4. Система состоит из накопителя, параллельно к которому подключены два регулятора тока, стабилизирующие ток заданной величины в секциях магнитной системы по мере разряда накопителя.

Накопитель электрической энергии емкостью  $C$  и внутренним сопротивлением  $r_0$  предварительно заряжается до напряжения  $U_{c0}$ , в несколько раз превышающего эффективное напряжение  $U_{s1}$  и  $U_{s2}$  каждой секции магнитной системы. В момент времени  $T_{\text{старт}}$  включаются регуляторы тока, токи в обмотках магнитной системы начинают нарастать (интервал  $t_0-t_1$  на рисунке 5) до заданных значений  $I_1$  и  $I_2$ , после чего выполняется их стабилизация по мере разряда накопителя. Стабилизация тока (интервал  $t_1-t_2$  на рисунке 5) возможна до тех пор, пока выходное напряжение накопителя превышает эффективное постоянное напряжение  $U_{s1}$  и  $U_{s2}$  каждой секции, после чего начинается резистивный разряд накопителя на их активное сопротивление (интервал  $t_2-t_3$  на рисунке 5). В момент времени  $T_{\text{стоп}}$  выключаются регуляторы, и ток в обмотках экспоненциально спадает через диод  $VD$  (интервал  $t_3-t_4$  на рисунке 5).

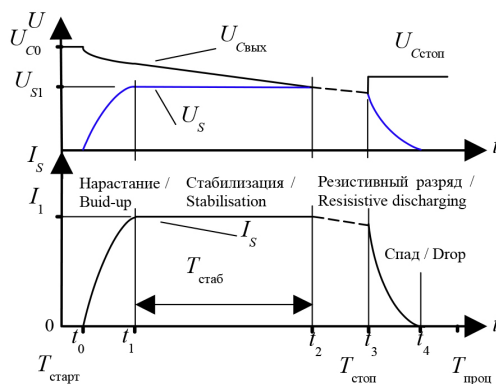
<sup>12</sup> Клюев А. С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. М. : Энергия, 1967. 104 с.



Р и с. 4. Схема питания двухсекционной магнитной системы от суперконденсаторного накопителя

F i g. 4. The power supply circuit of a two-section magnetic system from a supercapacitor storage device

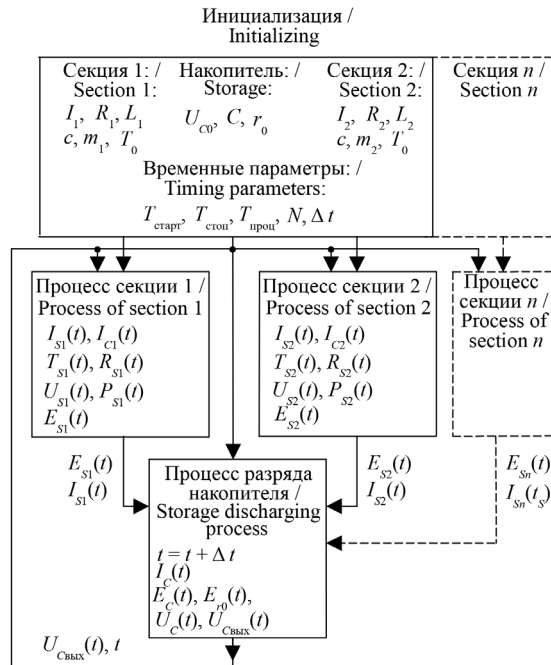
Примечание: УУ – устройство управления.  
 Note: УУ – control unit.



Р и с. 5. Графики, поясняющие работу схемы питания на примере одного канала

F i g. 5. Graphics explaining the operation of power supply scheme

Модель, описывающая процесс питания двухсекционной магнитной системы от общего накопителя, состоит из трех независимых, протекающих одновременно процессов. Блок-схема модели приведена на рисунке 6.



Р и с. 6. Блок-схема математической модели

F i g. 6. Block diagram of a mathematical model

В процессах секций 1 и 2 описывается поведение тока в обмотках, работающих совместно с регуляторами тока, а также вычисляются все связанные с ними переменные величины. К ним относятся потребляемый от накопителя ток, потребляемая обмоткой мощность, ее температура и сопротивление, а также энергия, выделяющаяся на ее активном сопротивлении. Далее, в процессе разряда накопителя, вычисляется полная потребляемая энергия, описывается поведение выходного напряжения накопителя, вычисляется выходное напряжение и ток накопителя. Общее время  $t$  для всех процессов вычисляется в процессе 3. Так как напряжение и ток накопителя вычисляется на основании суммарной энергии, потребленной всеми секциями, в данной математической модели может быть любое количество процессов, описывающих поведение тока в секциях.

Процесс моделирования начинается с инициализации, в ходе которой вводятся реальные параметры обмоток магнитной системы и накопителя. Параметрами обмоток являются ток  $I$ , сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , масса  $m$ , начальная температура  $T_0$  и удельная теплоемкость материала обмотки  $c$ . Параметрами накопителя являются зарядное напряжение  $U_0$ , емкость  $C$  и внутреннее сопротивление  $r_0$ . Моделирование выполняется в течение временного интервала  $T_{\text{проц}}$  с шагом  $\Delta t = T_{\text{проц}}/N$ , где  $N$  – количество точек на интервале моделирования.

При описании поведения тока каждый процесс секций 1 и 2 разбивается на четыре состояния: исходное, нарастание тока, стабилизация тока, резистивный разряд и затухание (рис. 5). В модели эти состояния развиваются последовательно друг за другом.

В исходном состоянии накопитель заряжен до напряжения  $U_{C0}$ , регулятор тока выключен, ток в обмотках магнитной системы отсутствует. В момент времени  $T_{\text{старт}}$  включается регулятор тока и процесс переходит в состояние нарастания тока.

Во время этого состояния ключ  $S$  всегда замкнут, накопитель подключен к обмотке, ток в которой начинает нарастать с нулевого значения. Реальные параметры элементов RLC-цепи, образуемой обмоткой и накопителем, таковы, что связанный с нарастанием тока переходной процесс носит аperiодический характер<sup>13</sup>. Поведение тока в обмотке во время состояния нарастания описывается следующим выражением:

$$I_{S1}(t) = \frac{U_{C0}}{L_1(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

где коэффициенты  $p_1$  и  $p_2$  – корни характеристического уравнения, соответствующего дифференциальному уравнению, которое описывает переходной процесс в RLC-цепи. Эти коэффициенты определяются для каждой обмотки перед началом моделирования согласно<sup>14</sup>. Так как ключ  $S$  всегда замкнут, выходной ток накопителя равен току обмотки:

$$I_{C1}(t) = I_{S1}(t).$$

Состояние нарастания тока продолжается до тех пор, пока выполняется следующее условие  $I_{S1}(t) < I_1$ . Как только ток в обмотке достигает заданного значения  $I_1$ , процесс переходит в состояние стабилизации тока, и засекается время  $t_1$ , характеризующее момент перехода в это состояние. В этом состоянии в обмотке течет постоянный ток, уровень которого стабилизируется регулятором тока:

$$I_{S1}(t) = I_1 = \text{const.}$$

Ток, потребляемый из накопителя, определяется как

$$I_{C1}(t) = \frac{P_{S1}(t)}{U_{\text{СВЫХ}}(t)},$$

где  $P_{S1}(t) = I_1^2 R_{S1}(t)$  – мощность, рассеиваемая на активном сопротивлении обмотки.

Стабилизация тока возможна до тех пор, пока выходное напряжение накопителя превышает эффективное напряжение обмотки:

$$U_{S1}(t) \leq U_{\text{СВЫХ}}(t).$$

Как только перестает выполняться это условие, стабилизация тока прекращается, засекается значение времени  $t_2$ , характеризующее момент окончания стабилизации тока. Ключ  $S$  при этом остается замкнутым, происходит резистивный разряд накопителя на активное сопротивление обмотки:

$$I_{S1}(t) = \frac{U_{\text{СВЫХ}}(t)}{R_1(t)}.$$

Во время резистивного разряда ток накопителя равен току обмотки:

<sup>13</sup> Основы теории цепей. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. / Г. В. Зевеке [и др.]. М.: Энергия, 1975. 752 с.

<sup>14</sup> Там же.

$$I_{C1}(t) = I_{S1}(t).$$

В момент времени  $T_{\text{стоп}}$  регулятор тока выключается, ключ  $S$  размыкается, обмотка магнитной системы отключается от накопителя, засекается значения тока в обмотке  $I_{S1}(T_{\text{стоп}})$ , процесс переходит в состояние затухания тока. В этом состоянии ток в обмотке спадает через диод  $VD$  по экспоненциальному закону:

$$I_{S1}(t) = I_{S1}(T_{\text{стоп}}) \cdot e^{-\frac{t-R_1(t)}{L_1}}.$$

Энергия из накопителя не потребляется, его выходной ток равен нулю  $I_{C1}(t) = 0$ .

При протекании тока вся потребленная из накопителя энергия выделяется на активном сопротивлении обмоток. Это приводит к их нагреву и росту активного сопротивления  $R$ . Текущее значение температуры обмотки вычисляется на всем интервале протекания тока:

$$T_1(t) = T_1(t - \Delta t) + \frac{P_{S1}(t) \cdot \Delta t}{c \cdot m_1},$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала обмотки, Дж/(кг · °C);  $m_1$  – масса обмотки, кг.

Активное сопротивление обмотки вычисляется следующим образом:

$$R_1(t) = R_{01} \cdot (1 + \alpha \cdot T_1(t)),$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала обмоток, °C<sup>-1</sup>;  $R_{01}$  – начальное сопротивление, Ом.

С ростом сопротивления обмотки растет потребляемая мощность:

$$P_{S1}(t) = I_{S1}^2(t) \cdot R_1(t),$$

а также увеличивается их эффективное постоянное напряжение:

$$U_{S1}(t) = I_{S1}(t) \cdot R_1(t).$$

Величина энергии, выделяющейся на активном сопротивлении обмоток, рассчитывается на протяжении всего процесса моделирования:

$$E_{S1}(t) = E_{S1}(t) + P_{S1}(t) \cdot \Delta t.$$

Полный ток, потребляемый из накопителя, равен суммарному току, потребляемому секциями:

$$I_C(t) = I_{C1}(t) + I_{C2}(t) + I_{Cn}(t).$$

Полная энергия, потребленная из накопителя, состоит из суммарной энергии, потребленной всеми секциями, и энергии потерь на внутреннем сопротивлении накопителя:

$$E_C(t) = E_{S1}(t) + E_{S2}(t) + E_{r0}(t) + E_{Sn}(t).$$

Энергия потерь на внутреннем сопротивлении накопителя вычисляется следующим образом:

$$E_{r0}(t) = E_{r0}(t) + I_C^2(t) \cdot r_0 \cdot \Delta t.$$

Напряжение на емкости накопителя без учета падения на его внутреннем сопротивлении определяется на основании полной потребленной энергии:

$$U_C(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot (E_{C0} - (E_{S1}(t) + E_{S2}(t) + E_{r0}(t)))}{C}}$$

Выходное напряжение накопителя с учетом падения на его внутреннем сопротивлении:

$$U_{\text{Свых}}(t) = U_C(t) - I_C(t) \cdot r_0.$$

По завершению процесса моделирования определяется длительность стабилизации тока и коэффициент использования запасенной в накопителе энергии. Этот коэффициент является отношением потребленной за время протекания тока энергии к изначально запасенной и показывает эффективность использования энергии накопителя магнитной системой:

$$K_E = \frac{E_{C0} - E_{\text{Сстоп}}}{E_0} \cdot 100\% = \frac{U_{C0}^2 - U_{\text{Сстоп}}^2}{U_{C0}^2} \cdot 100\%. \quad (2)$$

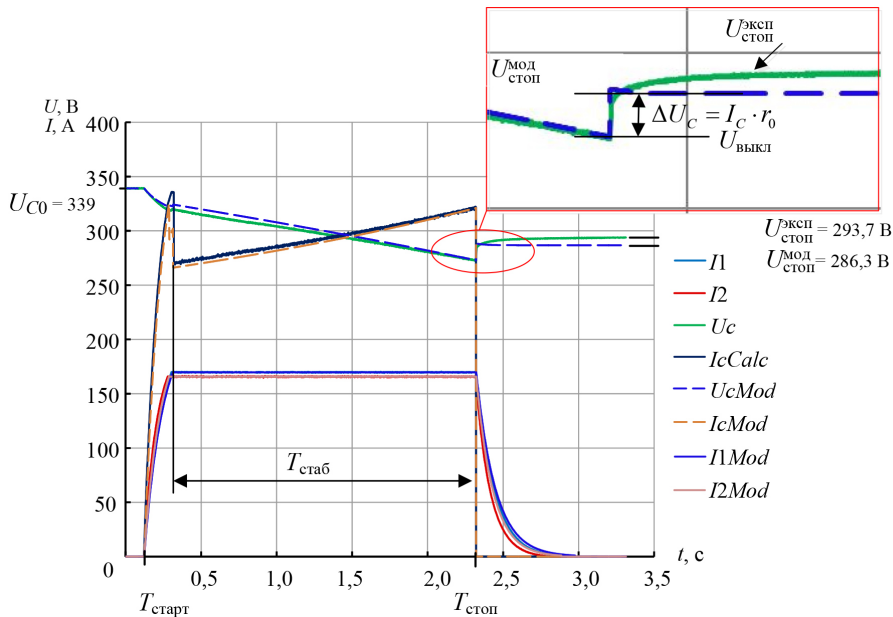
При определении этого коэффициента потребление энергии ведется до тех пор, пока возможна стабилизация тока в обоих каналах. В момент времени  $T_{\text{стоп}}$  или после прекращения стабилизации тока хотя бы в одной секции выключаются регуляторы тока, определяется длительность его стабилизации  $T_{\text{стаб}} = t_2 - t_1$ .

Перед сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными на основании значений массивов токов в секциях и выходного напряжения накопителя была определена мощность и энергия, потребляемые каждой секций, а также выходной ток накопителя. В процессе обработки также была определена мощность, потребляемая каждой секцией  $P_{S1,2}[k] = I_{S1,2}^2[k] \cdot R_{S1,2}[k]$ . В этом выражении и далее  $k = 0 \dots N$  – порядковый номер элементов массива;  $N$  – длина массива. При определении потребляемой мощности учитывался, по аналогии с моделированием, связанный с нагревом рост активного сопротивления обмоток. Длительность пауз между включениями источника составляла несколько минут, чего вполне достаточно для достижения теплового равновесия между обмотками и маслом. На основании чего начальная температура обмоток считалась равной температуре охлаждающего масла на выходе магнитной системы перед включением. При этом сопротивления обмоток были предварительно измерены при комнатной температуре. После чего определялся выходной ток накопителя  $I_C[k] = P_{S1}[k] + P_{S2}[k] / U_C[k]$  и падение напряжения на его внутреннем сопротивлении  $U_{r0}[k] = I_C[k] \cdot r_0$ . Энергия, потребленная обмотками магнитной системы, определялась как  $E_{S1,2}[k] = E_{S1,2}[k-1] + P_{S1,2}[k] \cdot \Delta t$ , а энергия потерь на внутреннем сопротивлении накопителя как  $E_{r0}[k] = E_{r0}[k-1] + I_C^2[k] \cdot r_0 \cdot \Delta t$ . Полная энергия, потребленная из накопителя, равняется сумме энергий, потребленных секциями, и энергии потерь на внутреннем сопротивлении накопителя  $\Delta E_C = E_{S1} + E_{S2} + E_{r0}$ .

Необходимым условием сравнения результатов эксперимента с моделированием, помимо равенства зарядного напряжения накопителя, параметров секций и токов, является равенство потребленной энергии  $E_{S1,S2}^{\text{эксп}} = E_{S1,S2}^{\text{мод}}$ ,  $E_{r0}^{\text{эксп}} = E_{r0}^{\text{мод}}$ ,

$E_C^{\text{эксп}} = E_C^{\text{мод}}$ , где эксп – значения, полученные экспериментально; мод – значения, полученные в результате моделирования.

Форма и значения токов в секциях магнитной системы, при которых обеспечивается необходимая индукция и распределение магнитного поля, а также выходного напряжения накопителя, показаны на рисунке 7. Для удобства сравнения на одном графике с ними показаны результаты моделирования.



Р и с. 7. Форма выходного тока и напряжения накопителя по результатам эксперимента и моделирования:  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_c$  – экспериментальные формы тока и напряжения;  $I_cCalc$  – расчетный выходной ток накопителя;  $U_cMod$ ,  $I_cMod$ ,  $I_1Mod$ ,  $I_2Mod$  – результаты моделирования

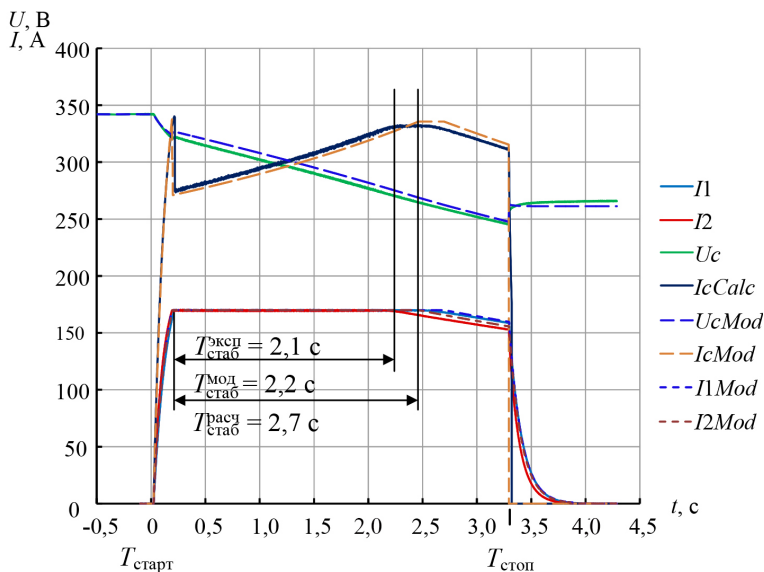
Fig 7. The shape of the output current and voltage of the storage device according to the results of the experiment and simulation:  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_c$  – experimental forms of current and voltage;  $I_cCalc$  – the calculated output current of the storage;  $I_cMod$ ,  $I_1Mod$ ,  $I_2Mod$  – simulation results

При сравнении экспериментальных данных с результатами моделирования видно, что значения и форма тока в обмотках магнитной системы полностью совпадают. Форма и значения выходного напряжения и тока накопителя также достаточно близки. Экспериментальное значение напряжения накопителя  $U_{\text{выкл}}$  в момент выключения регулятора тока совпадает с результатами моделирования. Уровень остаточного напряжения  $U_{\text{стоп}}$  накопителя спустя короткое время после выключения регуляторов и прекращения потребления также совпадает с результатами моделирования. При этом величина скачка напряжения  $\Delta U_c$  в течение короткого временного промежутка численно совпадает с падением напряжения на внутреннем сопротивлении накопителя  $\Delta U_c = I_c \cdot r_0$ . После чего остаточное напряжение накопителя, согласно результатам моделирования, остается постоянным, а в эксперименте наблюдается его постепенно замедляющийся рост в течение нескольких секунд с дальнейшим выходом на «плато». Это объясняется особенностями поведения суперконденсатора

при разряде, в ходе которого (согласно [13–15]) заряд первоначально потребляется из ветвей, имеющих меньшую постоянную времени. После прекращения потребления энергии также имеет место внутреннее перераспределение энергии с выравниванием потенциалов быстрых и медленных ветвей, чем объясняется рост остаточного напряжения накопителя после выключения регуляторов тока. Расхождение в скорости спада выходного напряжения накопителя в эксперименте и моделировании можно объяснить зависимостью емкости реального суперконденсатора от напряжения.

После отключения регуляторов тока и прекращения потребления энергии происходит перераспределение заряда по ветвям с последующим выравниванием их потенциалов. По этой причине будут иметь место расхождения в оценке коэффициента использования запасенной энергии, значение которого по результатам моделирования будет несколько больше реального. Численная оценка этого коэффициента по формуле (2) при паспортном значении емкости дает следующие значения: в эксперименте  $K_E^{\text{эксп}} = 24,96 \%$ , при моделировании  $K_E^{\text{мод}} = 28,67 \%$ . Также дополнительный вклад в это расхождение вносит прямая зависимость емкости реальных суперконденсаторов от зарядного напряжения<sup>15</sup> [13; 14; 16]. В моделировании же используется паспортное постоянное значение емкости.

В ходе экспериментов также определялась максимальная длительность стабилизации тока, которая затем сравнивалась с результатом моделирования и аналитического расчета. Накопитель во всех случаях был заряжен до 342 В, для удобства аналитического расчета значения тока в обеих секциях были одинаковыми и составляли 170 А, начальная температура обмоток – 24 °С, средняя мощность, потребляемая от накопителя, во время стабилизации тока – 87,5 кВт.



Р и с. 8. Форма тока и напряжения при максимальной длительности стабилизации тока

F i g. 8. The shape of current and voltage at the maximum duration of current stabilization

<sup>15</sup> Kurzweil P., Frenzel B., Gally R. Capacitance Characterization Methods and Ageing Behaviour of Supercapacitors.



Из графика на рисунке 8 видно, что после прекращения стабилизации в обоих случаях наблюдался спад тока сначала во второй секции, а затем и в первой. Сравнивая данный график с графиком на рисунке 7, можно заметить, что при увеличении потребляемой мощности наблюдается большее расхождение реального значения выходного напряжения накопителя с результатами моделирования. Это можно объяснить повышенным, по сравнению с паспортными данными, значением внутреннего сопротивления накопителя.

По результатам испытаний максимальная длительность стабилизации тока  $T_{\text{стаб}}$  составляет 2,1 с, что несколько меньше расчетной длительности, значение которой по результатам моделирования составляет 2,2 с. Эту разницу можно объяснить отличием динамических параметров накопителя, свойственных конкретному режиму работы и частотно-импульсному характеру потребления энергии, от паспортных значений, определяемых при других условиях<sup>16</sup>. Также на расхождение результатов может оказывать влияние небольшое различие температуры обмоток в эксперименте и моделировании. При моделировании начальная температура обмоток считалась равной температуре охлаждающего масла на выходе из магнитной системы после длительных (продолжительностью до нескольких минут) пауз между включениями, являющихся условием достижения теплового равновесия. В реальности температура обмоток могла незначительно превышать температуры охлаждающего масла.

Результат аналитического расчета длительности стабилизации тока по формуле (1) составляет 2,7 с, что существенно превышает результаты эксперимента и моделирования. Как отмечалось выше, при аналитическом расчете не учитывается множество факторов, влияющих на общий результат, который годится лишь для грубой оценки параметров накопителя.

**Обсуждение и заключение.** Математическая модель, описывающая на основании энергетического баланса процесс разряда суперконденсаторного накопителя на обмотки магнитной системы через регуляторы тока, стабилизирующие ток в обмотках, показала качественные сходства с экспериментальными результатами. Данная модель легко позволяет проводить масштабирование нагрузки путем добавления любого количества потребителей энергии, представляющих собой секции магнитной системы с независимой регулировкой тока в каждой. По результатам моделирования были также определены и экспериментально проверены максимальная длительность стабилизации тока и коэффициент использования запасенной в накопителе энергии. Полученные в результате моделирования и определенные экспериментально значения длительности стабилизации тока и коэффициент использования запасенной энергии при всех одинаковых параметрах накопителя и магнитной системы оказались достаточно близки. Значение коэффициента использования запасенной энергии, определенное экспериментально, на 15 % меньше значения, полученного в результате моделирования. Разница между полученной экспериментально длительностью стабилизации тока как более важного параметра

<sup>16</sup> IEC 62391-2-1:2006. International Standard. Fixed Electric Double Layer Capacitors for Use in Electronic Equipment; ГОСТ Р МЭК 62391-1-2023. Конденсаторы постоянной емкости с двойным электрическим слоем для электрического и электронного оборудования. Часть 1. Общие технические условия.



от длительности стабилизации тока, полученной в результате моделирования, составляет порядка 5 %. Она объясняется отличием динамических, свойственных конкретному режиму работы, параметров накопителя от паспортных значений, а также возможной разностью температуры обмоток в эксперименте и моделировании.

Можно сделать вывод, что паспортные значения емкости и внутреннего сопротивления накопителя достаточно хорошо отражают реальные характеристики накопителя с учетом особенностей его работы совместно с регулятором тока и импульсным характером потребляемого тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровин С. Д., Ростов В. В., Сморгонский А. В. Импульсно-периодический релятивистский карсинотрон // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 10. С. 1278–1280. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/1986/10/1278> (дата обращения: 17.05.2024).
2. Pulsed Power-Driven High-Power Microwave Sources / S. D. Korovin [et al.] // Proceeding of the IEEE. 2004. Vol. 92, Issue 7. P. 1082–1095. <https://doi.org/0.1109/JPROC.2004.829020>
3. Gold S. H., Nusinovich G. S. Review of High-Power Microwave Source Research // Review of Scientific Instruments. 1997. Vol. 68, Issue 11. P. 3945–3974. <https://doi.org/10.1063/1.1148382>
4. Korovin S. D., Rostov V. V. High-Current Nanosecond Pulse-Periodic Electron Accelerators Utilized a Testa Transformer // Russian Physics Journal. 1996. Vol. 39, No. 12. P. 1177–1185. <https://doi.org/10.1007/BF02436160>
5. Repetively Pulsed High-Current Accelerators with Transformer Charging of Forming Lines / G. A. Mesyats [et al.] // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21, Issue 2. P. 197–209. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212076>
6. Вольфович Ю. М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // Электрохимия. 2021. Т. 57, № 4. С. 197–238. EDN: AWUGYP
7. Sahin M. E., Blaabjerg F., Sangwongwanich A. A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Development s // Energies. 2022. Vol. 15, Issue 3. Article no. 674. <https://doi.org/10.3390/en15030674>
8. Вольфович Ю. М. Суперконденсаторы, выпускаемые промышленными компаниями // Электрохимическая энергетика. 2024. Т. 24, № 1. С. 3–27. EDN: POMDSM
9. Regulated DC Sources for Powering Magnetic Systems of Microwave Generators Based on Supercapacitor Storages / P. V. Vykhodstev [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2024. Vol. 67, No. 3. P. 471–483. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700684>
10. A Power Supply for One-Second Source of Highly-Stable Magnetic Field / D. M. Grishin [et al.] // PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001, 28th. IEEE International Conference on Plasma Science and 13th. IEEE International Pulsed Power Conference (17 – 22 June 2001, Las Vegas, USA). Las Vegas, 2001. P. 1638–1641. <https://doi.org/10.1109/PPPS.2001.1001880>
11. 4.8 MJ Magnetic Field Excitation Source Using Pulse Width Modulation Technique / J. June [et al.] // High Power Laser and Particle Beams. 2010. Vol. 22, No. 6. P. 1323–1326. <https://doi.org/10.3788/HPLPB20102206.1323>
12. Design of a 2 T Magnetic System Based on Storage Supercapacitor / X. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56, No. 9. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9144600> (дата обращения: 17.05.2024).
13. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2000. Vol. 36, Issue 1. P. 199–205. <https://doi.org/10.1109/28.821816>
14. Sahin M. E., Blaabjerg F., Sangwongwanich A. Modelling of Supercapacitors Based on Simplified Equivalent Circuit // CPSS Transactions on Power Applications. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 31–39. <https://doi.org/10.24295/CPSSSTREA.2021.00003>
15. Supercapacitor Management System: A Comprehensive Review of Modeling, Estimation, Balancing, and Protection Techniques / F. Naseri [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 155. Article no. 111913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111913>

16. Yang H. A Comparative Study of Supercapacitor Capacitance Characterization Methods // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 29. Article no. 101316. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101316>
17. Zhao J., Burke A. F. Review on Supercapacitors: Technologies and Performance Evaluation // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.013>

## REFERENCES

1. Korovin S.D., Rostov V.V., Smorgonsky A.V. [Pulse-Periodic Relativistic Carcinotron]. *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. 1986;29(10):1278–1280. (In Russ.) Available at: <https://radiophysics.unn.ru/issues/1986/10/1278> (accessed 17.05.2024).
2. Korovin S.D., Rostov V.V., Polevin S.D., Pegel I.V., Schamiloglu E., Fuks M., et al. Pulsed Power-Driven High-Power Microwave Sources. *Proceeding of the IEEE*. 2004;92(7):1082–1095. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.829020>
3. Gold S.H., Nusinovich G.S. Review of High-Power Microwave Source Research. *Review of Scientific Instruments*. 1997;68(11):3945–3974. <https://doi.org/10.1063/1.1148382>
4. Korovin S.D., Rostov V.V. High-Current Nanosecond Pulse-Periodic Electron Accelerators Utilized a Testa Transformer. *Russian Physics Journal*. 1996;39(12):1177–1185. <https://doi.org/10.1007/BF02436160>
5. Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Grishin D.M., et al. Repetitively Pulsed High-Current Accelerators with Transformer Charging of Forming Lines. *Laser and Particle Beams*. 2003;21(2):197–209. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212076>
6. Volkovich Yu.M. [Electrochemical Supercapacitors (Review)]. *Elektrokhimiya*. 2021;57(4):197–238. (In Russ.) EDN: AWUGYP
7. Sahin M.E., Bllaberg A., Sangwongwanich A. A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments. *Energies*. 2022;15(3):674. <https://doi.org/10.3390/en15030674>
8. Volkovich Yu.M. Supercapacitors Produced by Industrial Companies. *Electrochemical Energetics*. 2024;24(1):3–27. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: POMDSM
9. Vykhodstev P.V., Karpov Yu.A., Stepchenko A.S., Rostov V.V. Regulated DC Sources for Powering Magnetic Systems of Microwave Generators Based on Supercapacitor Storages. *Instruments and Experimental Techniques*. 2024;67(3):471–483. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700684>
10. Grishin D.M., Gubanov V.P., Gunin A.V., Korovin S.D., Stepchenko A.S. A Power Supply for One-Second Source of Highly Stable Magnetic Field. PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001, 28th. IEEE International Conference on Plasma Science and 13th. IEEE International Pulsed Power Conference (Las Vegas, USA June 17 – 22, 2001). Las Vegas, 2001:1638–1641. <https://doi.org/10.1109/PPPS.2001.1001880>
11. June J., Zhenxing J., Dian Z., Jianhua Ya., Ting S., Huihuang Z., et al. 4.8 MJ Magnetic Field Excitation Source Using Pulse Width Modulation Technique. *High Power laser and Particle Beams*. 2010;22(6):1323–1326. (In Chin., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.3788/HPLPB20102206.1323>
12. Yang X., Cui X., Zheng Z., Zhang H., Qiu W., Tang J. Design of a 2 T Magnetic System Based on Storage Supercapacitor. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2020;56(9). Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9144600> (accessed 17.05.2024).
13. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2000;36(1):199–205. <https://doi.org/10.1109/28.821816>
14. Sahin M.E., Blaabjerg A., Sangwongwanich A. Modelling of Supercapacitors Based on Simplified Equivalent Circuit. *CPSS Transactions on Power Applications*. 2021;6(1):31–39. <https://doi.org/10.24295/CPSSPEA.2021.00003>
15. Naseri F., Karimi S., Farjah B., Schaltz E. Supercapacitor Management System: A Comprehensive Review of Modeling, Estimation, Balancing, and Protection Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;155:111913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111913>
16. Yang H. A Comparative Study of Supercapacitor Capacitance Characterization Methods. *Journal of Energy Storage*. 2020;29:101316. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101316>
17. Zhao J., Burke A. Review on Supercapacitors: Technologies and Performance Evaluation. *Journal of Energy Chemistry*. 2021;59:276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.013>

*Об авторах:*

**Выходцев Павел Васильевич**, научный сотрудник отдела физической электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (634055, Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2569-7919>, Researcher ID: [AAE-2858-2022](https://orcid.org/0000-0003-2569-7919), SPIN-код: 9283-0909, [pave.vykhodtsev@mail.ru](mailto:pave.vykhodtsev@mail.ru)

**Ростов Владислав Владимирович**, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физической электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (634055, Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1718-0111>, Researcher ID: [A-2031-2012](https://orcid.org/0000-0002-1718-0111), SPIN-код: 1021-4897, [rostov@lfe.hcei.tsc.ru](mailto:rostov@lfe.hcei.tsc.ru)

**Степченко Алексей Станиславович**, научный сотрудник отдела физической электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (634055, Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7481-358X>, [lexa\\_stp@msn.com](mailto:lexa_stp@msn.com)

*Заявленный вклад авторов:*

П. В. Выходцев – постановка задачи, анализ литературных источников, разработка математической модели и ее реализация в программном пакете National Instruments LabView 2012, обработка и анализ результатов, подготовка текста статьи.

В. В. Ростов – постановка задачи, консультирование по теоретической части, планирование и организация экспериментов.

А. С. Степченко – консультирование по теоретической части, подготовка экспериментального оборудования и программного обеспечения, проведение исследований, обработка результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 12.08.2024; поступила после рецензирования 26.08.2024;  
принята к публикации 02.09.2024*

*About the authors:*

**Pavel V. Vykhodtsev**, Research Officer the Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (2/3 Academicheskyy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2569-7919>, Researcher ID: [AAE-2858-2022](https://orcid.org/0000-0003-2569-7919), SPIN-code: 9283-0909, [pave.vykhodtsev@mail.ru](mailto:pave.vykhodtsev@mail.ru)

**Vladislav V. Rostov**, Dr.Sci.(Phis.-Math.), Head of Department of Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, (2/3 Academicheskyy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1718-0111>, Researcher ID: [A-2031-2012](https://orcid.org/0000-0002-1718-0111), SPIN-code: 1021-4897, [rostov@lfe.hcei.tsc.ru](mailto:rostov@lfe.hcei.tsc.ru)

**Alexey S. Stepchenko**, Research Officer the Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, (2/3 Academicheskyy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7481-358X>, [lexa\\_stp@msn.com](mailto:lexa_stp@msn.com)

*Authors contribution:*

P. V. Vykhodtsev – formulating the problem, literature review, developing a mathematical model and its implementation in the National Instruments LabView 2012 software, processing and analyzing results, preparing the text of the article.

V. V. Rostov – formulating the problem, consulting on the theoretical part, planning and organization of experiments.

A. S. Stepchenko – consulting on the theoretical part, preparing experimental equipment and software, researching, processing results.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 12.08.2024; revised 26.08.2024; accepted 02.09.2024*



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.668-682>

EDN: <https://elibrary.ru/vxtbnp>

УДК 621.365.5:621.86.078.62

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



## Исследование индукционного нагрева скользящих металлоконструкций на повышенной частоте

Ю. Г. Чепелев<sup>1</sup>, Д. В. Ермоленко<sup>2</sup>,  
Л. Ю. Юферев<sup>3</sup> ✉, О. А. Рошин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт  
железнодорожного транспорта  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Российский университет транспорта  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ [leouf@yandex.ru](mailto:leouf@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Одним из условий безотказной работы движущихся и трущихся металлоконструкций в зимний период является отсутствие скоплений наледи и снега в зонах работы подвижных узлов и деталей. То же касается и движущихся сельскохозяйственных конструкций, у которых, например, существует вероятность примерзания к поверхности за пределами помещения для содержания животных. В статье на основе исследования стрелочного перевода предложена разработка инновационного, более экономичного и дешевого способа нагрева подвижных деталей.

**Цель исследования.** Создание технологии обогрева скользящих металлических поверхностей; обоснование параметров, разработка и упрощение конструкции оборудования.

**Материалы и методы.** С помощью системного подхода, методов математического анализа и энергетического баланса рассмотрены основные закономерности тепловых процессов в зоне контакта скользящих металлоконструкций. При рассмотрении указанных процессов приняты некоторые допущения: не учитывались теплопроводность грунта, скорость воздушного потока и другие физические процессы, поскольку они не оказывают существенного влияния на конечные результаты. Данные упрощения значительно облегчают тепловой расчет и получение необходимых аналитических выражений для определения параметров элементов индукционного нагрева.

**Результаты исследования.** Предложен и апробирован способ индукционного нагрева движущихся и трущихся металлоконструкций в зимний период, выявлены основные закономерности и определены технические характеристики. Доказана высокая эффективность и удобство индукционного нагрева по сравнению с другими способами электрического нагрева. Получены числовые значения параметров элементов индукционного нагрева, которые согласуются с экспериментальными данными.

**Обсуждение и заключение.** На основе разработанной схемы индукционного нагрева изготовлена экспериментальная модель мощностью до 1 000 Вт с частотой 10 кГц. Изготовленную экспериментальную модель исследовали в лабораторных и производственных условиях. Расчетная мощность нагрева детали составила 334 Вт,

© Чепелев Ю. Г., Ермоленко Д. В., Юферев Л. Ю., Рошин О. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



измеренная мощность составила 351 Вт. При этом деталь массой 20 кг нагрелась на 60 °С за 40 мин. При производственных испытаниях деталь нагрелась за 40 мин на 50 °С. Результаты исследований авторов могут быть использованы для проектирования индукционных нагревателей, работающих на повышенной частоте.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные металлоконструкции, стрелочный перевод, индукционный нагрев, резонансная система передачи электроэнергии, преобразователь электроэнергии

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование индукционного нагрева подвижных металлоконструкций на повышенной частоте / Ю. Г. Чепелев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 668–682. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.668-682>

## Study of Induction Heating of Metal Structures at Increased Frequency

Yu. G. Chepelev<sup>a</sup>, D. V. Ermolenko<sup>b</sup>,  
L. Yu. Yuferev<sup>c</sup>✉, O. A. Roshchin<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Railway Research Institute of JSC Russian Railways  
(Moscow, Russian Federation)*

<sup>b</sup> *Russian University of Transport  
(Moscow, Russian Federation)*

<sup>c</sup> *Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)*

✉ [leouf@yandex.ru](mailto:leouf@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** One of the conditions for trouble-free operation of moving and rubbing metal structures in winter is the absence of ice and snow accumulations in the operating areas of moving components. The same goes for moving agricultural constructions, which, for instance, can freeze to the surface outside the animal houses. In the article, based on the studying a turnout switch there is proposed the development of an innovative, more economical and cheaper method for heating moving parts.

**Aim of the Study.** The study is aimed at creating a technology for heating sliding metal surfaces and at justifying parameters, developing and simplifying equipment design.

**Materials and Methods.** Using a system approach, mathematical analysis and energy balance methods, there were considered the main patterns of thermal processes in the contact zone of sliding metal structures. When considering these processes, there were made some assumptions. Namely, there were not taken into account soil thermal conductivity, air speed, and other physical processes, because they do not have a significant impact on the final results. These assumptions greatly simplify thermal calculations and obtaining the necessary analytical expressions to determine the parameters of induction heating elements.

**Results.** The induction heating method for moving and rubbing metal structures in winter period has been proposed and tested, the main regularities have been revealed and technical characteristics have been determined. High efficiency and convenience of induction heating in comparison with other methods of electric heating have been proved. There have been obtained numerical values of parameters of induction heating elements, which agree with experimental data.

**Discussion and Conclusion.** Based on the developed induction heating scheme, an experimental model with a power of up to 1 000 watts with a frequency of 10 kHz was made. The manufactured experimental model was studied in laboratory and production conditions.

The estimated heating power of the part was 334 watts, the measured power was 351 watts. At the same time, the part weighing 20 kg heated up to 60 °C in 40 minutes. During production tests, the part was heated by 50 °C in 40 minutes.

The research results can be used to design induction heaters operating at an increased frequency.

**Keywords:** turnout switch, agricultural metal structures, induction heating, resonant power transmission system, power converter

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Chepelev Yu.G., Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Study of Induction Heating of Metal Structures at Increased Frequency. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):668–682. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.668-682>

**Введение.** Отсутствие скоплений наледи и снега в зонах работы подвижных узлов и деталей – важное условие безотказной работы движущихся и трущихся металлоконструкций в зимний период.

Стрелочные переводы являются одними из самых главных и ответственных элементов железнодорожного пути и представляют собой сложные технические устройства с большим числом механических подвижных компонентов [1; 2]. Одним из главных требований содержания стрелочных переводов является легкость перевода стрелки, что обеспечивается их смазкой и отсутствием загрязнений. Для Российской Федерации как северной страны очистка железных дорог от снежного загрязнителя представляет огромные трудности. Обледенение и снежные заносы элементов верхнего строения пути, прежде всего стрелочных переводов, представляют собой проблему, сдерживающую бесперебойный и безопасный пропуск поездов, решение которой остается весьма актуальным. Для очистки стрелочных переводов от снега и наледи используются различные методы в зависимости от конкретных природных условий [3].

Целью исследования является создание технологии принципиально нового способа обогрева скользящих металлических поверхностей; обоснование параметров, разработка и упрощение конструкции оборудования, работающего на повышенной частоте для нагрева скользящих металлических поверхностей до заданной температуры в автоматическом режиме, способствующего снижению расхода электроэнергии.

**Обзор литературы.** Для обеспечения бесперебойного и безопасного движения поездов в зимний период применяется индукционный нагрев подвижных деталей стрелочных переводов воздухом высокого давления, горячей водой, прикручиванием трубчатых электронагревателей (ТЭНов), нагревательного провода, инфракрасным излучением, а также с использованием геотермальных источников тепла [4]. Однако все эти способы являются энергозатратными, так как с их помощью нагревается весь рельс, а не конкретные примерзающие участки.

Не менее важной является проблема эксплуатации движущихся сельскохозяйственных металлоконструкций, используемых на открытом воздухе или в неотапливаемых помещениях. У таких металлических конструкций существует высокая вероятность примерзания к поверхности за пределами помещения для содержания

животных [5; 6]. Для исключения серьезных повреждений приходится применять различные защитные приемы<sup>1</sup>. Например, периодически включать оборудование на короткие промежутки времени, чтобы между включениями транспортер не успевал примерзнуть [7]. При этом промежутки времени зависят от температуры. Также известна проблема эксплуатации электродвигателей при температурных колебаниях с образованием конденсата и дальнейшим примерзанием ротора [8]. После отключения навозоуборочного транспортера оставшаяся влага на движущихся частях транспортера может примерзнуть к его конструкции, особенно в той его части, которая выходит из помещения наружу. Запуск электродвигателя наклонного транспортера в этих условиях может не произойти, так как электродвигатель не сдвинет с места примерзшие рабочие органы транспортера и без устройств защиты быстро выйдет из строя.

Известен экономичный способ индукционного нагрева, при котором осуществляется нагрев не всей поверхности детали или механизма, как это предлагается в работах [9; 10], а только технологического пятна на отливке стрелочной подушки скольжения, по которой движется остряк, перемещаясь из одного стыка к другому на повышенной частоте (2...10 кГц). Это позволяет значительно упростить монтаж оборудования [11; 12] и использовать те же элементы стрелочного перевода, которые выпускаются серийно, у которых есть сертификат, разрешающий использовать их на железнодорожном транспорте. Применение индукционного нагрева известно также в сельском хозяйстве, например, для нагрева емкостей с молоком [13]. В связи с этим, разработка индукционного способа нагрева необходимых фрагментов металлоконструкций за счет повышенной частоты является актуальной.

**Материалы и методы.** В исследованиях использовались эмпирические и теоретические методы исследования, теория теплотехники, электротехники.

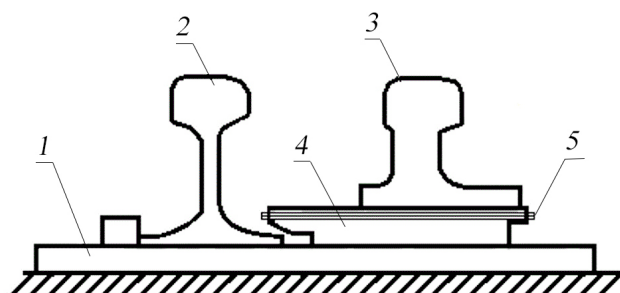
Инновационная резонансная система индукционного нагрева на повышенной частоте предназначена также и для нагрева движущихся сельскохозяйственных металлоконструкций, стрелочных переводов экономичным способом прямого нагрева. Индукционный нагрев происходит в токопроводящих средах за счет токов Фуко, возбуждаемых электромагнитным полем. В наших предыдущих исследованиях для создания магнитного поля применялись катушки индуктивности с ферритовыми сердечниками [14]. В данном исследовании с целью упрощения монтажа использовались индукторы без магнитопроводов<sup>2</sup>. Нагрев происходит в объеме, окруженном индукционной катушкой. Магнитное поле, созданное индукционной катушкой, сосредоточено внутри нагреваемой детали, поэтому в окружающей среде энергия не расходуется. На рисунке 1 представлена подкладка с подушкой стрелочного перевода 1 с намотанной катушкой индуктивности 5 на подушку скольжения 4.

<sup>1</sup> Червинский В. Л. Повышение эффективности навозоудаления на скотоводческих фермах на основе автоматизации оборудования : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Минск, 1992.

<sup>2</sup> Стребков Д. С., Юферев Л. Ю., Рошин О. А. Экспериментальные модели резонансных систем передачи электрической энергии // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2010. Т. 1. С. 295–301. EDN: PBFXWD



Питание катушек индуктивности происходит от передающего силового преобразователя, работающего в резонансном режиме на повышенной частоте, что позволяет уменьшить массогабаритные размеры оборудования. Передача электроэнергии от преобразователя к индукционным катушкам осуществляется по разработанному нами ранее резонансному способу передачи электроэнергии<sup>3</sup> при помощи коаксиального кабеля. Данная технология и оборудование позволяют обогревать не только элементы стрелочного перевода, но и движущихся сельскохозяйственных металлоконструкций, например, навозоуборочного транспортера, бесконтактным способом, не нагревая основание (щебеночный балласт, песок, землю), на котором находится нагреваемая деталь. Это исключает его вымывание талой водой, просадки или смещения, и в целом деформацию. Замена существующего стрелочного башмака не требуется, как это делается при замене шпал. Индукторы наматываются и монтируются на действующие элементы стрелочного перевода или навозоуборочного транспортера. На рисунке 2 представлена электрическая схема разрабатываемой технологии нагрева<sup>4</sup> [14]. Датчик состояния внешней окружающей среды включает разработанную схему только во время выпадения осадков в виде снега или ледяного дождя. Также в системе должен быть предусмотрен датчик нагрева деталей, отключающий схему при нагреве выше заданной температуры.



Р и с. 1. Схема устройства подушки скольжения башмака стрелочного перевода с рамочной рельсой и острием:

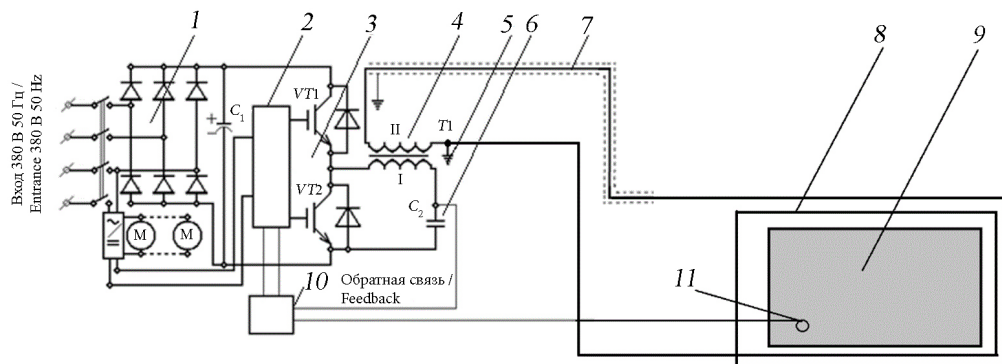
- 1 – подкладка;
  - 2 – рамочная рельса;
  - 3 – остриек;
  - 4 – стрелочная подушка скольжения;
  - 5 – катушка индуктивности (индукционный нагреватель)
- F i g. 1. The scheme of the device of the sliding cushion of the switch shoe with a frame rail and a wit:
- 1 – lining;
  - 2 – frame rail;
  - 3 – wit;
  - 4 – arrow slip cushion;
  - 5 – inductance coil (induction heater)

Источник: рисунки 1, 2 составлены авторами статьи.

Source: the diagrams 1, 2 are compiled by the authors of the article.

<sup>3</sup> Гребенюк В. Ф., Хомутов В. И., Калмыков Е. В. Выбор конфигурации и расчет индукторов для высокочастотного нагрева : методические указания к курсовому и дипломному проектированию. Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2002. 31 с.

<sup>4</sup> Там же; Стребков Д. С., Юферев Л. Ю., Рошин О. А. Экспериментальные модели резонансных систем передачи электрической энергии.



Р и с. 2. Электрическая схема прямого точечного индукционного нагрева повышенной частоты подушки скольжения башмака стрелочного перевода:  
 1 – блок питания; 2 – генератор повышенной частоты; 3 – силовые ключи преобразователя;  
 4 – резонансный повышающий трансформатор; 5 – заземление; 6 – емкость резонансного повышающего трансформатора; 7 – линия электропередачи; 8 – индукционная катушка;  
 9 – нагреваемая деталь; 10 – блок управления;  
 11 – внешний датчик состояния окружающей среды; М – вентиляторы охлаждения

F i g. 2. Electrical circuit of direct point induction heating with increased frequency of the sliding cushion of the switch shoe:  
 1 – power supply unit; 2 – high frequency generator; 3 – converter power switches;  
 4 – resonant step-up transformer; 5 – grounding; 6 – resonant step-up transformer capacity;  
 7 – power transmission line; 8 – induction coil; 9 – heated part; 10 – control unit;  
 11 – external ambient sensor media; М – ventilators

При индукционном нагреве повышает температуру только токопроводящее тело, а не нагревательный элемент [15]. В поверхностном слое, называемом глубиной проникновения электромагнитного поля, выделяется 86 % всей мощности, что позволяет экономить электроэнергию по сравнению с нагревом при помощи ТЭН. Теория позволяет определить глубину проникновения электромагнитного поля:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0 \mu}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·м;  $\omega$  – круговая частота электромагнитного поля:

$$\omega = 2\pi f,$$

где  $f$  – частота, Гц;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость нагреваемой детали, показывающая, во сколько раз проницаемость материала больше проницаемости вакуума, равная

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0},$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м.

После подстановки значений круговой частоты и магнитной проницаемости вакуума в выражение (1) формула глубины проникновения примет вид [13]:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}.$$

Мощность, необходимая для нагрева:

$$P_n = mC(t_2 - t_1)/\tau_k, \quad (2)$$

где  $m$  – масса нагреваемых деталей, кг;  $C = 668$  Дж/(кг °С) – теплоемкость нагреваемых деталей;  $(t_2 - t_1)$  – разница конечной и начальной температур нагреваемой детали, °С;  $\tau_k$  – время нагрева, с.

Глубина проникновения электромагнитного поля в железе на частоте 10 000 Гц составляет около 0,6 мм.

**Результаты исследования.** На основе разработанной схемы индукционного нагрева изготовлена экспериментальная модель системы прямого нагрева технологического пятна металлоконструкций, работающих в резонансном режиме на повышенной частоте [12].

Техническая характеристика экспериментальной модели: напряжение питания передающего силового преобразователя<sup>5</sup> – 380 В, 50 Гц; выходная мощность передающего силового преобразователя – 2...20 кВт; частота передающего силового преобразователя – 10 000 Гц; напряжение в линии электропередачи – менее 1 кВ; габаритные размеры передающего силового преобразователя – 500×400×350; длина линии электропередачи от передающего силового преобразователя до стрелочного перевода места нагрева – до 1 500 м; мощность нагрева башмака (подошвы) – 300...400 Вт; температура нагрева башмака – на 50 °С и более.

Изготовленную экспериментальную модель исследовали в лабораторных условиях. На рисунке 3 представлен снимок тепловизора, показывающий степень нагрева подпятника и катушки индуктора, а также распределение температуры нагрева по поверхности изделия во время исследования. Время нагрева 30 мин, потребляемая мощность 350 Вт.

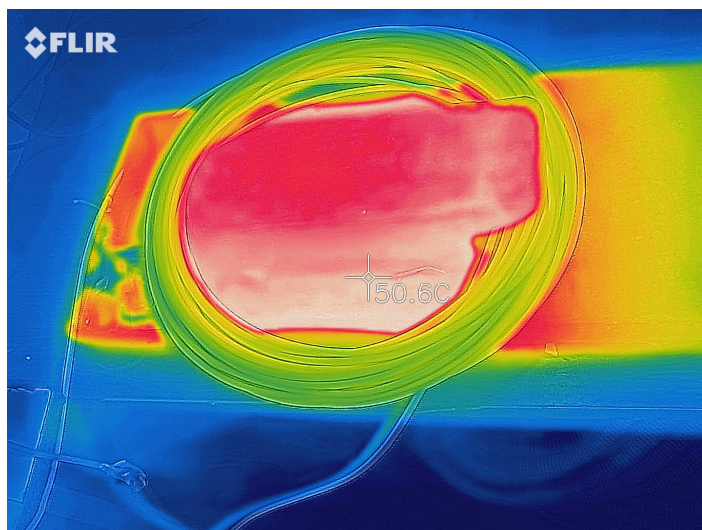
Расчетная мощность, на основе формулы (2), необходимая для нагрева пятна подпятника стрелочного перевода при массе нагреваемой детали 20 кг, времени нагрева 2 400 с, разности температур 60 °С, составит:

$$P = 20 \cdot 668 \cdot 60 / 2400 = 334 \text{ Вт.}$$

Результаты испытания на нагрев технологического пятна подпятника стрелочного перевода, с замером температуры на технологическом пятне, индукционной катушке, а также температура самого башмака представлены на рисунке 4.

Напряжение питания устройства – 414 В; потребляемый ток – 0,85 А; потребляемая мощность – 351,9 Вт; напряжение на индукторе – 100 В; ток – 9 А; частота – 10 кГц; мощность индуктора – 900 В·А. Количество витков зависит от частоты и напряжения, подаваемого на индуктор.

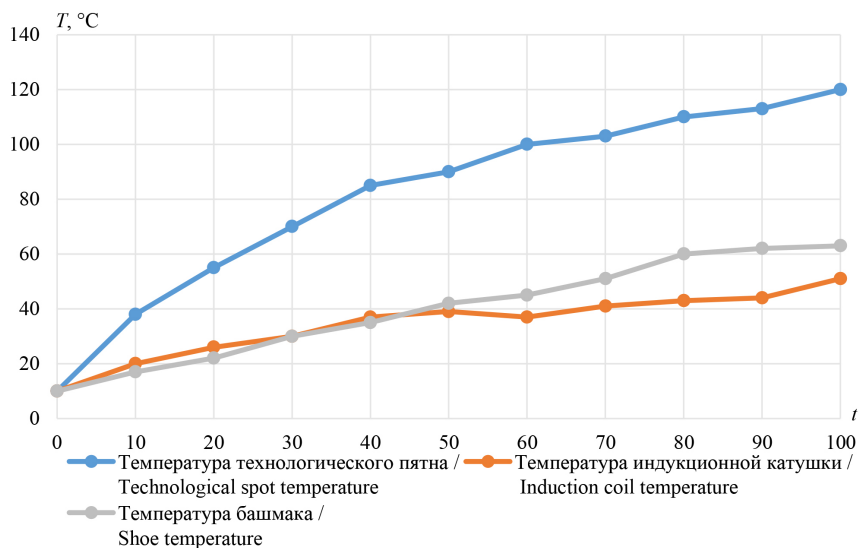
<sup>5</sup> Королев В. В. Инженерное снеговедение: Теплораспределение на стрелочных переводах : моногр. М., 2021. 154 с. EDN: UQYYCH



Р и с. 3. Тепловизионный снимок индукционного нагревателя  
F i g. 3. Thermal imaging of an induction heater

*Источник:* снимок сделан с помощью тепловизора FLIR Л. Ю. Юферевым в лаборатории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (22.09.2020).

*Source:* the photo was taken using a FLIR thermal imager by L. Yu. Yuferev in the institute's laboratory (September 22, 2020).



Р и с. 4. Зависимость температуры нагрева элементов устройства от времени  
F i g. 4. The dependence of the heating temperature of the device elements on time

*Источник:* составлено авторами статьи на основе лабораторных исследований.

*Source:* the diagram is compiled by the authors of the article on the basis of laboratory studies.

Для испытания разработанного оборудования в реальных условиях был проведен второй эксперимент при температуре наружного воздуха  $-21,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 5 изображено начало эксперимента.



Р и с. 5. Начало испытания экспериментальной модели системы прямого индукционного нагрева металлических изделий, работающей в резонансном режиме на повышенной частоте

F i g. 5. The beginning of the experiment of an experimental model of a direct induction heating system for metal products operating in a resonant mode at an increased frequency

*Источник:* фотографии для рисунков 5, 6 сделаны при испытании способа индукционного нагрева О. А. Роциным на территории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (11.02.2021).

*Source:* the photos for figures 5, 6 were taken during testing of the induction heating method by O. A. Roshchin on the territory of the institute (February 11, 2021).

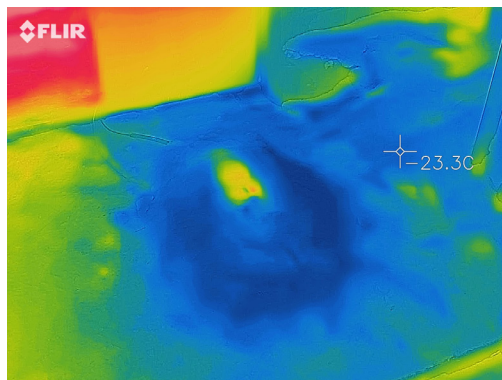
Чтобы нагреваемая деталь адаптировалась к уличной температуре, ее выдержали в снегу в течение 4 часов (рис. 6).



Р и с. 6. Выдерживание изделия под снегом на морозе в течение 4 часов

F i g. 6. Keeping the product under snow in the cold for 4 hours

На рисунке 7 представлены тепловизионный снимок после включения нагрева (время нагрева составляло 1 ч) и снимок эксперимента через 2 ч.



a)



b)

Р и с. 7. Эксперимент нагрева подошвы рельса:  
 а) тепловизионный снимок начала нагрева детали (время нагрева 1 ч);  
 б) снимок нагрева детали (время нагрева 2 ч)

Fig. 7. The experiment of heating the sole of the rail:  
 a) thermal image of the beginning of the heating of the part (heating time 1 hour);  
 b) a snapshot of the heating of the part (heating time 2 hours)

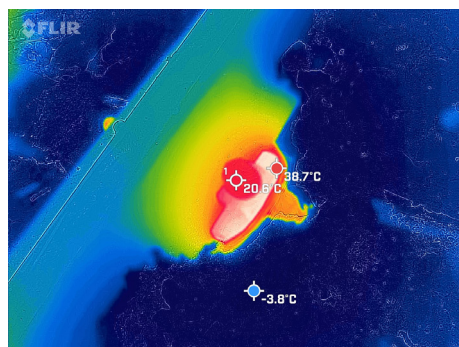
*Источник:* а) снимок сделан с помощью тепловизора FLIR Л. Ю. Юферевым на территории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (11.02.2021); б) фотография сделана О. А. Рошиным на территории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (11.02.2021).

*Source:* a) the photo was taken using a FLIR thermal imager by L. Yu. Yuferev on the territory of the institute (February 11, 2021); b) the photo was taken by O. A. Roshchin on the territory of the institute on (February 11, 2021).

В результате эксперимента оказалось, что через 2 ч нагреваемая поверхность полностью очистилась от снега, при этом ее температура составляла +44,5 °С. Температура подушки башмака скольжения увеличилась на 70 °С, что может решить проблемы недогрева, описанные в монографии<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Королев В. В. Инженерное снеговедение: Теплораспределение на стрелочных переводах. *Electrical technologies and equipment*

После лабораторных экспериментов были проведены исследования разработанного оборудования на испытательном железнодорожном кольце в Щербинке. Из-за отсутствия доступа к стрелочному переводу испытания проводились на фрагменте железнодорожного пути. Индуктор, состоящий из 20 витков провода ПВЗ-4, был намотан на рельсовое скрепление. При температуре окружающего воздуха  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  подошва нагрелась до температуры  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 40 мин (рис. 8).



a)



b)

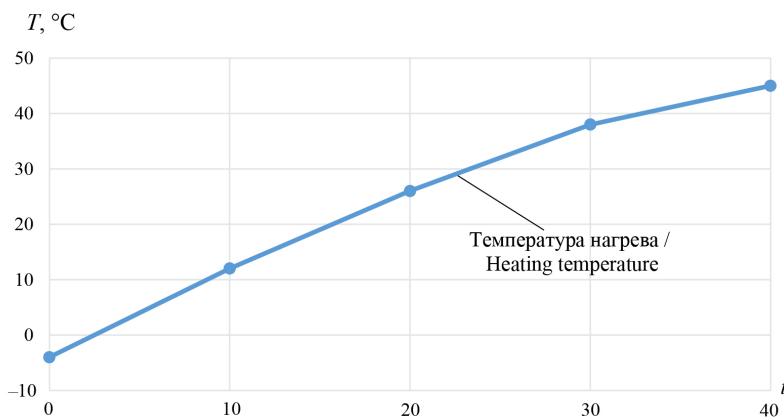
Р и с. 8. Эксперимент нагрева подошвы рельса через 40 мин после включения:  
 а) тепловизионный снимок эксперимента нагрева подошвы рельса;  
 б) снимок эксперимента нагрева подошвы рельса

F i g. 8. The experiment of heating the sole of the rail 40 minutes after switching on:  
 а) thermal imaging of the experiment of heating the sole of the rail;  
 б) a snapshot of the rail sole heating experiment

*Источник:* а) снимок сделан с помощью тепловизора FLIR Л. Ю. Юфевым на территории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (11.02.2021); б) фотография сделана О. А. Рошиным на территории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (11.02.2021).

*Source:* а) the photo was taken using a FLIR thermal imager by L. Yu. Yuferev on the territory of the institute (February 11, 2021); б) the photo was taken by O. A. Roshchin on the territory of the institute (February 11, 2021).

Из полученных результатов (рис. 9) видно, что нагревается только металлическая деталь, находящаяся в магнитном поле, за 40 мин нагрев составляет около  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Р и с. 9. График нагрева рельсового скрепления

F i g. 9. Heating schedule of the rail fastener

*Источник:* составлено авторами статьи по результатам производственных испытаний.

*Source:* the diagram is compiled by the authors of the article based on the results of production tests.

**Обсуждение и заключение.** Разработанная технология индукционного нагрева металлоконструкций имеет преимущества за счет прямого, а не косвенного нагрева необходимых элементов, что снижает расход электроэнергии и позволяет объединить преобразователь электроэнергии с датчиками окружающей среды, благодаря чему система может работать в автоматическом режиме:

- низкий уровень электромагнитного излучения (до 100 мкТл/м);
- большое расстояние между генератором и индукторами (до 1 000 м);
- экономия электроэнергии по сравнению с действующими и предполагаемыми технологиями (менее 350 Вт.ч на каждый элемент при времени нагрева менее 1 ч);
- нагревается только подушка скольжения башмака стрелочного перевода, по которой скользит остряк рельсы, а не ТЭНы, передающие тепло рельсе, или весь стрелочный перевод;
- увеличение скорости нагрева до заданной температуры (до 70 °С/ч);
- простота применения технологии на стрелочном переводе;
- возможность применения одного передающего силового преобразователя на несколько нагреваемых элементов металлоконструкций за счет параллельного подключения нескольких индукционных нагревателей.

Расчетная и испытанная мощность одного индукционного нагревателя составляет 350 Вт [16]. При такой мощности можно нагреть детали массой 20 кг на 60 °С за 70 мин, при этом снег полностью растаивает. Рабочая частота в 10 кГц повышает уровень электробезопасности [17]: нагрев происходит только в нагреваемой детали, а не в индукторе или подстилке, на которой находится нагреваемая деталь.

Технология монтажа оборудования индукционного нагрева металлоконструкций может производиться без вывода их из эксплуатации.

Результаты исследований показали возможность применения индукционного способа нагрева различных скользящих металлоконструкций в зимнее время и могут быть использованы для проектирования подобных систем.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басовский Д. А., Говоров В. В., Козлов И. С. Новое решение системы обогрева железнодорожных стрелочных переводов путей необщего пользования // Бюллетень результатов научных исследований. 2019. № 3. С. 38–45. URL: <https://elck.ru/3EbcYZ> (дата обращения: 25.05.2024).
2. Ким К. К. Оптимизация энергопотребления системы электрообогрева железнодорожных стрелочных переводов // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 1. С. 50–60. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-1-50-60>
3. Андреев В. Е., Лисицын А. И. Комплексная система электрообогрева и смазки стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 2. URL: [https://pph-magazine.ru/abstract/article\\_post/annotacii-statej-no-02-2020-g](https://pph-magazine.ru/abstract/article_post/annotacii-statej-no-02-2020-g) (дата обращения: 25.05.2024).
4. Зацаринная И. А., Кучеренко Д. Е., Кучеренко Р. Е. Повышение надежности асинхронного двигателя сельскохозяйственного назначения эксплуатируемого во влажной среде // Проблемы научной мысли. 2022. Т. 7, № 1. С. 158–161. EDN: TVAEYY
5. Мазуха А. П. Вариант защиты навозоборочного транспортера от обрыва при примерзании скребков и различных перегрузках // Воронежский научно-технический вестник. 2015. Т. 4, № 3. С. 63–66. URL: [http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary\\_24353762\\_76034371.pdf](http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary_24353762_76034371.pdf) (дата обращения: 25.05.2024).
6. Мазуха А. П., Мазуха Н. А. Защита навозоборочных транспортеров коровников от повреждения в зимнее время и при возможных перегрузках // Воронежский научно-технический вестник. 2017. Т. 1, № 1. С. 54–57. URL: [http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary\\_29029219\\_53541238.pdf](http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary_29029219_53541238.pdf) (дата обращения: 25.05.2024).
7. Ершов М. С., Максютлов С. Г. Контроль температурного режима и ресурса изоляции обмоток электрооборудования в процессе эксплуатации // Промышленная энергетика. 2009. № 4. С. 20–22. URL: <https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/exp000107.html> (дата обращения: 25.05.2024).
8. Система tripleS для обогрева стрелочных переводов // Железные дороги мира. 2011. № 4. С. 69–72. URL: [https://zdmira.com/images/pdf/\\_dm2011-04\\_69-72.pdf](https://zdmira.com/images/pdf/_dm2011-04_69-72.pdf) (дата обращения: 25.05.2024).
9. Королёв В. В., Шишкина И. В., Колосков Д. С. Системы обеспечения безотказной работы стрелочных переводов зимой // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 11. С. 13–16. URL: [https://pph-magazine.ru/abstract/article\\_post/annotacii-statej-no-11-2020-g](https://pph-magazine.ru/abstract/article_post/annotacii-statej-no-11-2020-g) (дата обращения: 25.05.2024).
10. Колисниченко Е. А. Исследование влияния инфракрасного излучателя на удаление снега с подвижных частей стрелочного перевода // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1 (61). С. 107–112. EDN: VTFJPZ
11. Ермоленко Д. В., Юферев Л. Ю., Рошин О. А. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78, № 1. С. 48–53. EDN: ZIKXBJ
12. Устройство для индукционного нагрева стрелочного перевода : патент 142522 Российская Федерация / Ермоленко Д. В. [и др.]. № 2014110730/11 ; заявл. 21.03.2014 ; опубл. 27.06.2014.
13. Научно-технические основы разработки установки с индукционным нагревом для пастеризации молока / Е. Н. Неверов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 128–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>
14. Ermolenko D., Uferov L., Roshchin O. Electrical Supply of Railway Transport Infrastructure Objects at High Frequency // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2019. P. 730–736. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_71)
15. Ермоленко Д. В., Юферев Л. Ю., Рошин О. А. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на объекты и инфраструктуры ОАО «РЖД» // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2018. Т. 77, № 5. С. 295–300. EDN: YMLZJZ
16. Юферев Л. Ю., Рошин О. А., Александров Д. В. Математическое моделирование работы резонансной системы передачи электроэнергии // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 2. С. 37–41.
17. Юферев Л. Ю. Особенности работы однопроводных электросетей повышенной частоты // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 4. С. 14–19. EDN: ZEHDYL



## REFERENCES

1. Basovsky D.A., Govorov V.V., Kozlov I.S. A New Solution to the Heating System for Non-Public Railway Track Switch Assembly. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2019;3:38–45. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3EbcYZ> (accessed 25.05.2024).
2. Kim K.K. Optimization of Power Consumption of the Electrical Heating System of Railway Turnouts. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2021;1:50–60. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-1-50-60>
3. Andreev V.E., Lisitsyn A.I. [Integrated System of Electric Heating and Lubrication of Turnouts]. *Railway Track and Facilities*. 2020;2. (In Russ.) Available at: [https://pph-magazine.ru/abstract/article\\_post/annotacii-statej-no-02-2020-g](https://pph-magazine.ru/abstract/article_post/annotacii-statej-no-02-2020-g) (accessed 25.05.2024).
4. Zatsarinnyaya I.A., Kucherenko D.E., Kucherenko R.E. [Improving the Reliability of an Asynchronous Motor for Agricultural Purposes Operated in a Humid Environment]. *Problems of Scientific Thought*. 2022;7(1):156–161. (In Russ.) EDN: TVAEYY
5. Mazukha A.P. [A Variant of Protection of the Manure Conveyor from Breakage During Freezing of Scrapers and Various Overloads]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2015;4(3):63–66. (In Russ.) Available at: [http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary\\_24353762\\_76034371.pdf](http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary_24353762_76034371.pdf) (accessed 25.05.2024).
6. Mazukha A.P., Mazukha N.A. [Protection of Manure Conveyors of Cowsheds from Damage in Winter and During Possible Overloads]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2017;1(1):54–57. (In Russ.) Available at: [http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary\\_29029219\\_53541238.pdf](http://vestnikvglta.ru/gallery/elibrary_29029219_53541238.pdf) (accessed 25.05.2024).
7. Ershov M.S., Maksyutov S.G. [Monitoring the Temperature Regime and Insulation Resource of Electrical Equipment Windings During Operation]. *Industrial Power Engineering*. 2009;4:20–22. (In Russ.) Available at: <https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/exp1000107.html> (accessed 25.05.2024).
8. [TripleS System for Heating Turnouts]. *Railways of the World*. 2011;4:69–72. (In Russ.) Available at: [https://zdmira.com/images/pdf\\_dm2011-04\\_69-72.pdf](https://zdmira.com/images/pdf_dm2011-04_69-72.pdf) (accessed 25.05.2024).
9. Korolev V.V., Shishkina I.V., Koloskov D.S. [Systems for Ensuring Trouble-Free Operation of Turnouts in Winter]. *Railway Track and Facilities*. 2020;11:13–16. (In Russ.) Available at: [https://pph-magazine.ru/abstract/article\\_post/annotacii-statej-no-11-2020-g](https://pph-magazine.ru/abstract/article_post/annotacii-statej-no-11-2020-g) (accessed 25.05.2024).
10. Kolisnichenko E.A. Research of Influence Infrared Radiation on Removing Snow from Movable Joint of the Switch. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2016;1(61):107–112. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VTFJPZ
11. Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Test Results of the Resonant Single-Wire Power Transmission System for Induction Heating of the Switch Rail. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(1)48–53. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZIKXBJ
12. Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Kirin O.Yu. [Device for Induction Heating of a Switch]. Patent 142522 Russian Federation. 2014 June 27. (In Russ.)
13. Neverov E.N., Vladimirov A.A., Korotkih P.S., Nikolaeva E.V., Porokhnov A.N. Scientific and Technical Basis for the Development of an Induction Heating Unit for Milk Pasteurization. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):128–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>
14. Ermolenko D., Yuferev L., Roshchin O. Electrical Supply of Railway Transport Infrastructure Objects at High Frequency. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. 2019:730–736. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_71)
15. Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Test Results of Resonant Single Wire System Transmitting Power to the Infrastructure Objects of the JSC “RZD”. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(5):295–300. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YMLZJZ
16. Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Aleksandrov D.V. Mathematical Modeling of the Operation of a Resonant Power Transmission System. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023;70(2):37–41. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Yuferev L.Yu. Operation Peculiarities of Single-Wire High Frequency Power Transmission Lines. *Sel'skokhozyaystvennyye Mashiny i Tekhnologii*. 2017;4:14–19. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZEHLYL

*Об авторах:*

**Чепелев Юрий Григорьевич**, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела электротехнических испытаний Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (129626, Российская Федерация, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9175-1501>, [chepelev.yuri@vniizht.ru](mailto:chepelev.yuri@vniizht.ru)

**Ермоленко Дмитрий Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Российского университета транспорта (127994, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7379-0635>, Researcher ID: LSI-6009-2024, Scopus ID: 57205073360, [yermoldv@mail.ru](mailto:yermoldv@mail.ru)

**Юфев Леонид Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2751-3247>, Researcher ID: AAG-1315-2021, Scopus ID: 57201922939, SPIN-код: 9586-6852, [leouf@ya.ru](mailto:leouf@ya.ru)

**Рошин Олег Алексеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9115-6312>, SPIN-код: 5689-9725, [olerosh@yandex.ru](mailto:olerosh@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Ю. Г. Чепелев – определение методологии исследования, формирование выводов, доработка текста.  
Д. В. Ермоленко – формирование основной концепции исследования, формулирование выводов.  
Л. Ю. Юфев – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста, визуализация и редактирование.  
О. А. Рошин – литературный и патентный анализ, проведение экспериментов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 23.08.2024; поступила после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 13.09.2024*

*About the authors:*

**Yuri G. Chepelev**, Cand.Sci. (Eng.), Deputy Manager of the Electrical Testing Department, Railway Research Institute of JSC Russian Railways (10 3rd Mytishchinskaya St., Moscow 129626, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9175-1501>, [chepelev.yuri@vniizht.ru](mailto:chepelev.yuri@vniizht.ru)

**Dmitry V. Ermolenko**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Russian University of Transport (9, Building 9 Obraztsova St., Moscow 127994, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7379-0635>, Researcher ID: LSI-6009-2024, Scopus ID: 57205073360, [yermoldv@mail.ru](mailto:yermoldv@mail.ru)

**Leonid Yu. Yuferev**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Proezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2751-3247>, Researcher ID: AAG-1315-2021, Scopus ID: 57201922939, SPIN-code: 9586-6852, [leouf@ya.ru](mailto:leouf@ya.ru)

**Oleg A. Roshchin**, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Proezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9115-6312>, SPIN-code: 5689-9725, [olerosh@yandex.ru](mailto:olerosh@yandex.ru)

*Authors contribution:*

Yu. G. Chepelev – definition of the study methodology, formulation of conclusions, revision of the text.  
D. V. Ermolenko – formulation of the basic concept of the study, formulation of conclusions.  
L. Yu. Yuferev – conducting experimental studies, processing experimental results, preparing the initial version of the text, visualization and editing.  
O. A. Roshchin – literary and patent analysis, conducting experiments.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 23.08.2024; revised 06.09.2024; accepted 13.09.2024*

### Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)
- 1.3.6. Оптика (технические науки)
- 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
- 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Цель статьи (Aim of the Article);
- 3) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 4) Результаты исследования (Results);
- 5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

*Приводится на русском и английском языках.*

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

#### 10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением ВОАI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Чаткин Михаил Николаевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-44-20.

Гордина Екатерина Павловна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

### Information for authors and readers of the journal

*Engineering Technologies and Systems* journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and iThenticate systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

*The title should be written in Russian and English.*

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

*The abstract should be written in Russian and English.*

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

*Keywords should be written in Russian and English.*

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

*Acknowledgements should be written in Russian and English.*

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

*References should be written in Russian and English.*

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

*Information about the authors should be written in Russian and English.*

9. **Authors contribution.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

*Contribution of the authors should be written in Russian and English.*

#### 10. Manuscript Format Guidelines.

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

*Engineering Technologies and Systems* is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levstev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Mikhail N. Chatkin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254420.

Ekaterina P. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.



Редакторы – *М. А. Сульдина, С. Х. Зинина*  
Перевод *Н. Н. Плеханковой*  
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*  
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.  
Подписано в печать 11.12.2024 г. Дата выхода в свет 28.12.2024 г.  
Формат 70 × 100<sup>1/16</sup>. Усл. печ. л. 13,65.  
Тираж 1 000 экз. 1 завод – 150 экз. Заказ № 678. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24  
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)





Editors *M. A. Suldina, S. H. Zinina*  
Translation *N. N. Plekhankova*  
Desktop publishing *E. A. Klimkina*  
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.  
Signed to print 11.12.2024. Date of publishing 28.12.2024.  
Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 13.65.  
Number of copies 1 000. Factory 1 – 150 copies. Order no. 678. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)